

Fischgängigkeit von Forellengewässern unter spezieller Berücksichtigung hoher Gefälle

20.09.2023

Auftrag: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, Jagd und Fischerei, 5000 Aarau
Autoren: Armin Peter, Nils Schölzel & Lisa Wilmsmeier

Auftraggeber

Departement Bau, Verkehr und Umwelt
Abteilung Wald
Sektion Jagd und Fischerei
5000 Aarau

Kontaktperson

Corinne Schmid
corinne.schmid@ag.ch

Auftragnehmer

FishConsulting GmbH
Hagmattstr. 7
4600 Olten
Tel. 079 964 06 44
apeter@fishconsulting.ch

Projektleitung

Dr. Armin Peter, FishConsulting GmbH, Olten

Zitierungsvorschlag

Peter, A., Schölzel, N. & Wilmsmeier, L. 2023. Fischgängigkeit von Forellengewässern unter spezieller Berücksichtigung hoher Gefälle. Literaturanalyse im Auftrag der Sektion Jagd und Fischerei des Kantons Aargau. 39 S.

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag des Departements Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, Jagd und Fischerei verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Fotos

Titelblatt: Springende Seeforelle am Wasserfall «saut de la truite» in der Areuse bei Boudry NE.
© Armin Peter

Alle weiteren Fotos © FishConsulting GmbH



Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	4
2	Methoden	4
3	Grundlagen zur Hindernispassage von Fischen	5
3.1	Passage durch Schwimmen	5
3.2	Passage durch Springen.....	7
3.2.1	<i>Berechnung der Sprunghöhe</i>	8
3.2.2	<i>Voraussetzungen für erfolgreiches Springen</i>	10
3.2.3	<i>Empirische Sprunghöhen von Salmoniden</i>	11
3.2.4	<i>Sprungverhalten und Sprunghöhen anderer Fischarten</i>	11
4	Charakteristik von Hindernissen	13
4.1	Klassifizierung von Barrieren	13
4.2	Häufige Barrieretypen in kleinen Fließgewässern und ihre Charakterisierung.....	14
4.3	Einschätzung der Passagemöglichkeiten.....	18
5	Fischgängigkeit in Durchlässen	19
5.1	Charakterisierung von Durchlässen.....	19
5.2	Durchlässe als Passagehindernis	19
5.3	Gestaltung fischgängiger Durchlässe	20
5.3.1	<i>Stream Simulation Design</i>	20
5.3.2	<i>Hydraulic Design Option</i>	21
5.4	Literaturwerte und Empfehlungen für diverse Parameter	21
5.4.1	<i>Länge</i>	22
5.4.2	<i>Fliessgeschwindigkeit</i>	22
5.4.3	<i>Wassertiefe</i>	23
5.4.4	<i>Gefälle</i>	24
5.4.5	<i>Substrat</i>	24
5.4.6	<i>Absturz am Auslass</i>	25
5.4.7	<i>Licht</i>	26
6	Fallstudie Fischgängigkeit Altholzbach	27
6.1	Allgemeines	27
6.2	Fang und Markierung der Fische	28
6.3	PIT-Tag Anlage	29
6.4	Resultate Fischaufstieg.....	30
6.4.1	<i>Benötigte Zeit für den Aufstieg</i>	31
6.4.2	<i>Diurnaler Verlauf des Aufstiegs</i>	32
6.5	Fazit Altholzbach	32
7	Fazit	33



8	Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis.....	34
9	Dank.....	35
10	Literatur	36



1 Hintergrund

Es bestehen immer wieder Schwierigkeiten in der Beurteilung von potenziellen Aufwanderungshindernissen in Fischgewässern. Speziell schwierig ist es, in steilen Forellengewässern einzelne hohe Barrieren bezüglich ihrer Fischgängigkeit zuverlässig zu beurteilen. Ganz besonders trifft das in kleinen Fließgewässern zu, von denen man über die dort lebende Forellenspopulation keine konkreten Kenntnisse hat, die Populationszusammensetzung nicht kennt und nicht weiss, ob die Forellen in ihren Bewegungen durch die dort vorhandenen Barrieren eingeschränkt sind.

Die Sektion Jagd und Fischerei des Kantons Aargau war mehrmals mit solchen Fragen konfrontiert und vermisste eine verfügbare Zusammenstellung, die Auskunft über Passagemöglichkeiten von Forellen in kleinen, steilen Fließgewässern gibt. Nach einer gemeinsamen Besichtigung des Altholzbaches in Fahrwangen AG entstand die Idee, mit einer Literatursuche die wichtigsten Referenzen und Empfehlungen zur Passage von Hindernissen zu dokumentieren und als kurze Empfehlungen zusammenzustellen. Aus diesem Grunde erteilte die Sektion Jagd und Fischerei des Kantons Aargau der Firma FishConsulting GmbH einen entsprechenden Auftrag. Die Dokumentation sollte in einem Bericht zusammengestellt werden, der künftig dazu beitragen soll, potenzielle Barrieren in kleinen, steilen Forellengewässern mit grosser Sicherheit zu erkennen. Eine solche Zusammenstellung sollte auch Grundlagen für künftige Planungen und Bauten oder aber für das Entfernen von bestehenden Bauten in entsprechenden Gewässern bereitstellen.

2 Methoden

Für die Erarbeitung dieses Berichtes wurde die publizierte wissenschaftliche Literatur, aber auch die «graue Literatur» (Texte, die nicht in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht wurden) berücksichtigt. Für die publizierte Literatur wurde mit dem «Web of Science» nach entsprechenden Publikationen gesucht. Die graue Literatur wurde mittels Suchabfragen auf Internetbrowsern durchsucht. Zusätzlich wurden veröffentlichte Bücher separat einbezogen.

Für die Suchabfrage wurden vor allem die Wörter «jumping» und «leaping» verwendet. Es war auffallend, dass zum Sprungverhalten der Fische nur eine geringe Anzahl von Literaturarbeiten existiert. Die gefundenen Literaturarbeiten wurden sorgfältig auf die Themen maximale Schwimmgeschwindigkeit, maximale Sprunghöhen sowie Mindesttiefen für schwimmende Fische durchsucht. Eine ausführliche Suche wurde zum aktuellen Wissensstand bei Durchlässen vorgenommen. Dabei wurden die Suchbegriffe «culvert», «pipes», «road crossing» in Kombination mit «fish passage» verwendet. Zum Thema Durchlässe war vor allem die graue Literatur sehr nützlich.

Neben der Literaturstudie wurde am Altholzbach (Gemeinde Fahrwangen) eine experimentelle Studie zur Fischgängigkeit über ein steiles Bauwerk durchgeführt.



3 Grundlagen zur Hindernispassage von Fischen

3.1 Passage durch Schwimmen

In der Regel versucht ein Fisch eine Barriere schwimmend zu überwinden. Dies ist jedoch bei Abstürzen und Hindernissen mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Untiefen nicht möglich. An Überfällen versucht der Fisch das Hindernis springend zu passieren. Ob ein potenzielles Hindernis ohne Überfall eine Barriere darstellt oder durchschwommen werden kann, lässt sich wie folgt abschätzen. Die gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit adulter Fische (Forellen/Cypriniden/Perciden) beträgt zirka 5 Körperlängen pro Sekunde (Jens 1997). Wenn nun die gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit eines Fisches schneller ist als das fließende Wasser und der Fisch in 5 - 8 Minuten eine Strecke zurücklegen kann, die länger ist als das potenzielle Hindernis, dann dürfte es sich fast sicher um kein Wanderhindernis handeln. Jungfische besitzen eine gesteigerte Schwimmgeschwindigkeit, die dem 7 - 15-fachen der Körperlänge pro Sekunde entspricht (Pavlov 1989).

Wird die Sprintgeschwindigkeit adulter Fische eingesetzt (10 - 12 Körperlängen pro Sekunde), dann muss diese ebenfalls höher liegen als das fließende Wasser und man kann berechnen, welche Strecke der Fisch in zirka 3 Sekunden zurücklegt (Vorschlag ONEMA 2014). Die Maximalgeschwindigkeit ist jedoch nur bei höheren Temperaturen erreichbar (Beach 1984; Abbildung 1). Ist seine zurückgelegte Strecke grösser als die Länge des Hindernisses, dann wird der Fisch in der Lage sein, dieses zu passieren. Dazu ein Beispiel: Eine Eindolung ist 7.5 m lang und das Wasser fließt mit 1 m/s. Eine 20 cm lange Bachforelle schwimmt pro Sekunde maximal 2.4 m weit (Sprintgeschwindigkeit). Da sie aber gegen die Strömung schwimmt, kommt sie pro Sekunde nur 1.4 m weit. In 3 Sekunden durchschwimmt die Forelle also lediglich eine Strecke von 4.2 m und kann daher das Hindernis nicht passieren. Eine 30 cm lange Forelle schwimmt pro Sekunde 3.6 m, gegen die vorgegebene Strömung also 2.6 m. In 3 Sekunden kommt sie 7.8 m weit und dürfte somit in der Lage sein, das Rohr zu passieren.

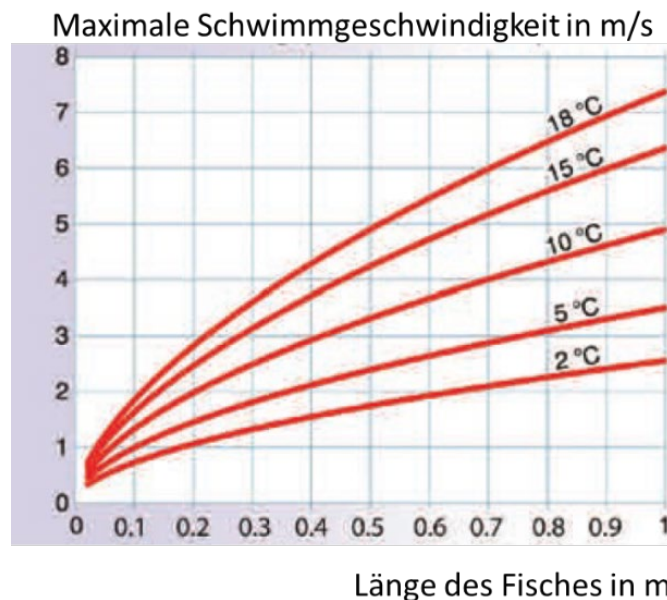


Abbildung 1: Schwimmgeschwindigkeit von Salmoniden in Abhängigkeit der Körperlänge und Wassertemperatur (aus ONEMA 2014)



Die **maximale Schwimmgeschwindigkeit** (U_{\max}) eines Fisches ist vor allem eine Funktion seiner Körperlänge. Gemäss Videler (1993) gilt folgende Gleichung:

$$U_{\max} = 0.4 + 7.4 \cdot \text{Fischlänge in m}$$

Die Schwimmgeschwindigkeit wird in m/s angegeben.

Top-Speed Geschwindigkeit für Forellen nach Castro-Santos et al. (2013):

$$U_{\max} = 19 \cdot \text{Fischlänge in m}$$

Mehrere Autoren haben sich mit der Schwimmgeschwindigkeit von Fischen auseinandergesetzt. Eine neuere Publikation von Castro-Santos et al. (2013) basiert auf Schwimmversuchen in breiteren Kanälen (Länge 20 m, Breite 0.8 m, tiefe 1 m) und kommt für Forellen zu deutlich höheren Schwimmgeschwindigkeiten als die vorangehenden Untersuchungen, welche meist in Schwimmröhren durchgeführt wurden. Diese höheren Schwimmgeschwindigkeiten werden als Sprint- oder Top-Speed-Geschwindigkeiten bezeichnet. Bei den Forellen wurden vor allem Fische mit einer Länge von 10-24 cm bei Temperaturen von ungefähr 12° C getestet.

In einer neuen Publikation von Garcia-Diaz et al. (2022) wird vorgeschlagen, die von Castro-Santos berechnete Schwimmgeschwindigkeit mit einem Korrekturfaktor zu benutzen. Die vorgeschlagene Formel ist jedoch ebenfalls nur gültig für Temperaturen nahe bei 12° C und für Fische bis maximal 25 cm Totallänge. Aus diesem Grunde wird hier nicht weiter auf diese Berechnung eingegangen.

Tabelle 1 gibt Schwimmgeschwindigkeiten von Forellen an auf der Basis der Videler Gleichung. Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Top-Speed Geschwindigkeiten deutlich höher liegen können. Diese Berechnungen gelten für Fische zwischen 10-24 cm bei Temperaturen nahe 12° C.

Tabelle 1: Beispiele für die maximalen Schwimmgeschwindigkeiten von Forellen nach der Gleichung von Videler (1993). Die Werte gelten für wärmere Wassertemperaturen (10-15° C). Bei Temperaturen von 2-5° C betragen die Schwimmgeschwindigkeiten nur zirka 50 %.

Totallänge (cm)	U_{\max} (m/s)
10	1.14
20	1.88
30	2.62
40	3.36
50	4.1
75	5.95
100	7.8



3.2 Passage durch Springen

Salmoniden verfügen über ein ausgezeichnetes Sprungvermögen und versuchen Abstürze springend zu passieren. In Laborstudien wies Stuart (1962) nach, dass die Bedingungen zum Springen ideal sind, wenn das Verhältnis von der Höhe des Hindernisses zur Kolkentiefe unterhalb des Hindernisses (*Plunge Pool*) 1:1.25 beträgt. Evans & Johnston (1980) empfehlen eine Pooltiefe von 1.5 - 2-mal der Höhe des Hindernisses. Meixler et al. (2009) fordern hingegen als Pooltiefe 2-mal die Länge des Fisches. In keinem dieser Vorschläge sind jedoch der Winkel des Wasserfalles oder der Abfluss berücksichtigt. Die Autoren des französischen ICE Protokolls (ONEMA 2014) schlagen hingegen vor, zumindest den Winkel zu berücksichtigen. Somit wird folgende Formel zur Berechnung der Mindesttiefe des Pools vor dem Hindernis vorgeschlagen:

$$H_{fmin} = \sqrt{DH * \sin \alpha}$$

Dabei sind H_{fmin} die minimale Wassertiefe, DH die Höhe des Überfalls und α der Winkel des Wasserfalles (Abbildung 2). Falls der Winkel 90° beträgt gilt:

$$H_{fmin} = \sqrt{DH}$$

Rechenbeispiel: Die Überfallhöhe beträgt 1.5 m, das Wasser fällt vertikal in den Pool. Die nötige Pooltiefe ist daher $\sqrt{1.5} = 1.22$ m.

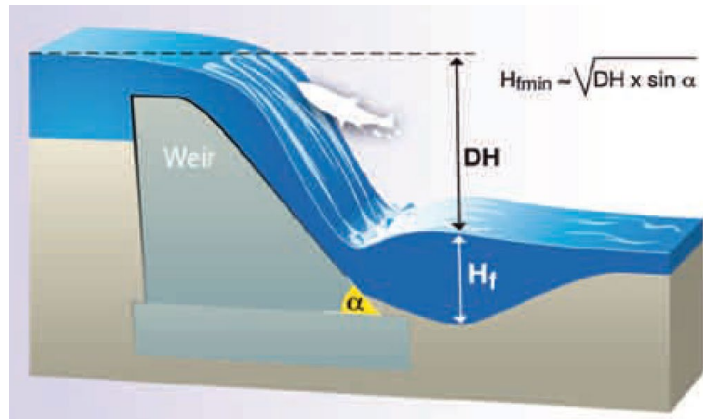


Abbildung 2: Nötige Tiefe eines Pools um die Passierbarkeit für Salmoniden zu gewährleisten. Diese Tiefe muss zirka 0.5 – 1 m hinter dem Wasserstrahl vorhanden sein (aus ONEMA 2014).

Tiefe des *Plunge Pools* H_f

Um gute Voraussetzungen für eine springende Passage eines Fisches zu gewährleisten, soll die Tiefe des Pools mit der Gleichung

$$H_{fmin} = \sqrt{DH * \sin \alpha}$$

berechnet werden.

Unter idealen Bedingungen können Salmoniden Hindernisse demzufolge springend passieren, wobei bei Lachsen Sprünge von 2 - 3 m Höhe dokumentiert wurden (Stuart 1962, Jones 1959). Powers & Orsborn (1985) zeigen auf, dass die Sprunghöhen und -weiten der Fische vom Winkel abhängen, mit dem die Fische abspringen. Je steiler der Sprungwinkel, umso höher die Sprunghöhe, aber auch umso kürzer die Sprungdistanz.

Damit ein schwimmender Fisch seine Maximalgeschwindigkeit bei einer Hindernispassage – schwimmend oder springend - erreichen kann, muss die Wassersäule eine minimale Tiefe aufweisen. Für die Passage von Fischaufstiegshilfen schlägt DWA (2014) eine Wassertiefe vom 2.5-fachen der Körperhöhe des Fisches vor. Französische Autoren schlagen hingegen eine Tiefe der 1.5-fachen Körperhöhe als minimale Tiefe für schwimmende Fische vor (ONEMA 2014). Die Körperhöhen der Forellen sind in Dönni et al. (2014) aufgelistet. Eine 30 cm lange Forelle weist eine Körperhöhe von 6.4 cm auf. Die nötige Wassertiefe wäre somit bei der Annahme der 1.5-fachen Körperhöhe 9.6 cm. Wird hingegen mit dem Faktor 2.5 gerechnet, ergibt dies für diese 30 cm lange Forelle eine nötige Wassertiefe von 16 cm. Um



bei wandernden Fischen jedoch auf der sicheren Seite zu sein, gilt in der Schweiz die Empfehlung einer generellen Mindestwassertiefe von 20 cm (Dönni et al. 2014). Bei Untiefen sind für die Passierbarkeit geringere Tiefen in Restwasserstrecken möglich, jedoch nur über kurze Strecken (Strecke entspricht dem Fünffachen der Fischlänge: L_{\max}). In Einzelfällen – auf einer Strecke von maximal 5 m – kann die Mindestwassertiefe das 1fache der Körperhöhe, aber mindestens 7 cm betragen.

Minimale Wassertiefe bei der Hindernispassage

Die minimal verlangte Wassertiefe beträgt das 1.5-fache der Körperhöhe des Fisches. Um jedoch eine gut ausreichende Tiefe zu gewähren, wird eine Wassertiefe von 2.5-mal der Körperhöhe empfohlen.

3.2.1 Berechnung der Sprunghöhe

Gallagher (1999) schlägt für die Berechnung der Sprunghöhe h folgende einfache Gleichung vor:

$$h = v^2/2g$$

v wird abgeschätzt, indem 8 - 12 mal die Fischlänge pro Sekunde eingesetzt wird. Je nach Gesundheitszustand wird ein Faktor zwischen 8 und 12 ausgewählt. g entspricht dem mittleren Wert der Fallbeschleunigung von 9.81 m/s^2 . Rechenbeispiel: Wie hoch kann eine 40 cm lange Forelle springen? Für den Wert der Geschwindigkeit wird der Faktor von 10 mal die Länge (L) des Fisches eingesetzt.

$$\begin{aligned} h &= (10 L)^2/2g \\ &= (10 \cdot 0.4)^2 / 2 \cdot 9.81 \\ &= 0.81 \text{ m} \end{aligned}$$

In der Formel von Gallagher (1999) wird jedoch der Absprungwinkel des Fisches nicht berücksichtigt. Grundsätzlich entspricht der Sprung eines Fisches der Flugbahn eines Projektils (Abbildung 3). Daher lässt sich die maximale Sprunghöhe als Funktion der Schwimmgeschwindigkeit und des Absprungwinkels wie folgt berechnen (ONEMA 2014):

$$Y_{\max} = (U_{\max} \sin\beta)^2 / 2g$$

Dabei entspricht Y_{\max} der maximalen Sprunghöhe, U_{\max} der Maximalgeschwindigkeit des Fisches und β dem Absprungwinkel. Lauritzen et al. (2010) beobachteten, dass die meisten Fische in einem Winkel von zirka 60° abspringen.



vertikale Distanz in m

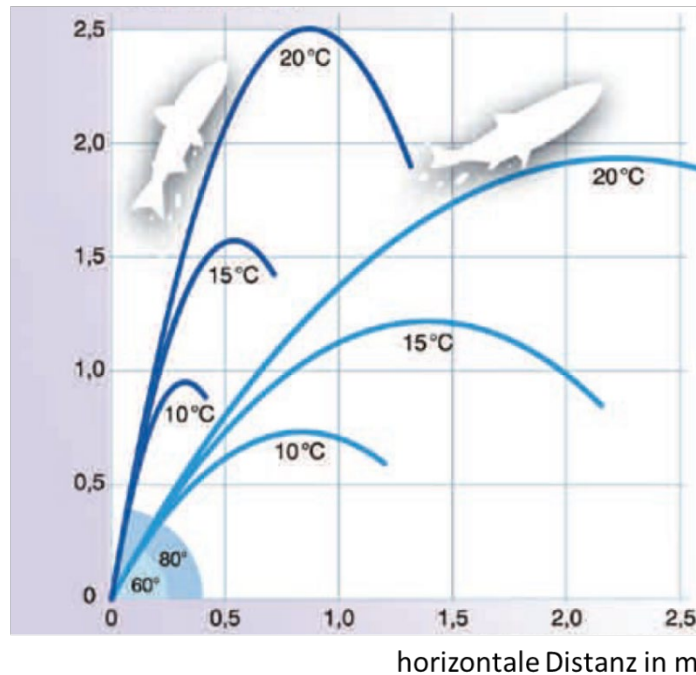


Abbildung 3: Theoretische Flugbahn eines 80 cm langen Lachses in Abhängigkeit des Absprungwinkels und der Wassertemperatur (aus ONEMA 2014). Die Sprunghöhe vergrößert sich mit zunehmender Temperatur und zunehmender Steilheit des Absprungwinkels.

Bei den dargestellten Sprunghöhen handelt es sich um Mindestwerte, da nicht in Betracht gezogen wird, dass der Fisch zusätzlich seine Schubkraft verwendet, welche ebenfalls eine Funktion der Fischlänge ist. Aus diesem Grunde wird die tatsächliche Sprunghöhe wie folgt berechnet: $Y_{\max} + L/2$ (m).

Tabelle 2 gibt Auskunft über die Sprunghöhe eines Fisches in Abhängigkeit seiner Länge sowie der Schwimmgeschwindigkeit unter Anwendung der Gleichung von Videler (1993). Der angenommene Absprungwinkel ist 60° und durchschnittliche Sprunghöhe wird mit $Y_{\max} + L/2$ berechnet. Für die Berechnung der maximalen Sprunghöhe bei diesem Winkel wird $Y_{\max} + L$ verwendet. Für die Abschätzung der Sprunghöhe der Fische kann der durchschnittliche oder der maximale Wert verwendet werden, je nach vorherrschenden Bedingungen für den Sprung.



Tabelle 2: Schwimgeschwindigkeit (nach Videler 1993) und Sprunghöhe von Salmoniden (nach ONEMA 2014, bei einem Absprungwinkel von 60° und unter Berücksichtigung der Schubkraft (maximale Springhöhe). Diese Werte gelten für Temperaturen von zirka 10-15° C.

Fischlänge (m)	U_{\max} (m/s)	Durchschnittliche Sprunghöhe (m)	Maximale Sprunghöhe (m)
0.90	7	2.3	2.8
0.80	6.5	2.0	2.4
0.75	6	1.8	2.1
0.70	5.5	1.5	1.8
0.60	5	1.3	1.6
0.55	4.5	1.1	1.3
0.50	4	0.9	1.1
0.40	3.5	0.7	0.9
0.35	3	0.5	0.7
0.30	2.5	0.4	0.5
0.20	2	0.3	0.3
0.15	1.5	0.2	0.2

Sprunghöhe

Die Formeln von Gallagher (1999) und die Tabelle 2 mit den Werten von Videler (1993) liefern je nach Fischlänge unterschiedliche Resultate. Es wird empfohlen für die Abschätzung der Sprunghöhen die Tabelle 2 mit der Gleichung von Videler (1993) sowie der Annahme eines Absprungwinkels von 60° zu verwenden. Bei durchschnittlichen Bedingungen für den Sprung wird die Spalte mit den Werten der durchschnittlichen Sprunghöhen verwendet, bei optimalen Bedingungen die Spalte mit den maximalen Sprunghöhen.

3.2.2 Voraussetzungen für erfolgreiches Springen

Die wichtigsten Voraussetzungen für einen erfolgreichen Sprung sind die minimalen Wassertiefen im *Plunge Pool* (Kapitel 3.2, S. 8) sowie eine ausreichende Wassertiefe am Kopf des Hindernisses (h_{\min}). h_{\min} soll den minimalen Tiefen entsprechen, die für schwimmende Fische vorausgesetzt werden: mindestens 20 cm Tiefe oder 1.5-mal die Körperhöhe. Dies ist jedoch ein absoluter Minimalwert und der empfohlene Wert beträgt 2.5-mal die Körperhöhe des Fisches.

Zusätzlich beeinflusst die Wassertemperatur die Sprunghöhe. Bei kaltem Wasser (< 10 °C) springt ein Fisch nur etwa halb so hoch wie bei wärmeren Temperaturen (15 - 18 °C). Im Weiteren ist die Sprunghöhe abhängig von der Grösse des Fisches (siehe Tabelle 2).



3.2.3 Empirische Sprunghöhen von Salmoniden

Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung von beobachteten Sprunghöhen von Salmoniden. Die Länge der Fische wurde bei den Beobachtungen meist nicht angegeben, ebenso fehlen in der Regel weitere Details wie Temperatur, Pooltiefe oder Absprungwinkel. Es zeigt sich, dass Salmoniden durchaus in der Lage sind, höher zu springen als die theoretischen Berechnungen ergeben.

Tabelle 3: Empirisch ermittelte Sprunghöhen von Salmoniden

Art	Lateinischer Name	Sprunghöhe	Referenz
Bachforelle			
- Keine Angaben		0.8 m	Reiser & Peacock 1985
- 23 cm, Kolktiefe 1 m, Winkel 90°	<i>Salmo trutta</i>	1.45 m	Merwald 1986
- Sömmerling 9 cm		> 0.25 m	Ammann 2006
Atlantischer Lachs	<i>Salmo salar</i>	3.3 m 3.65 m	Reiser & Peacock 1985 Mills 1971
Chinook salmon	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	2.4 m	Reiser & Peacock 1985
Coho salmon	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	2.2 m	Reiser & Peacock 1985
Sockeye salmon	<i>Oncorhynchus nerka</i>	2.1 m	Reiser & Peacock 1985
Pink salmon	<i>Oncorhynchus gorbuscha</i>	1.2 m	Reiser & Peacock 1985
Steelhead	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	3.3 m	Reiser & Peacock 1985
Cuttthroat trout	<i>Oncorhynchus clarki</i>	0.8 m	Reiser & Peacock 1985
Arktische Äsche	<i>Thymallus arcticus</i>	0.9 m	Reiser & Peacock 1985
Europäische Äsche	<i>Thymallus thymallis</i>	0.85 m	Ovidio et al. 2002
Bachsaibling			
- < 150 mm	<i>Salvelinus fontinalis</i>	0.64 m	Kondratieff & Myrick
- > 150 mm		0.74 m	2006

3.2.4 Sprungverhalten und Sprunghöhen anderer Fischarten

Neben Salmoniden springen auch einzelne Arten der Nichtsalmoniden. Es ist davon auszugehen, dass die Sprungfähigkeit einzelner Arten unterschätzt wird oder wenig dazu bekannt ist (z. B. Alet, Barbe, Schneider, Hecht).

Im Grunde gelten für die Sprunghöhen von Nicht-Salmoniden ebenfalls die in Kapitel 3.2 beschriebenen Formeln und Voraussetzungen. Da sich die Untersuchung der Sprungfähigkeit von Fischen jedoch vor allem auf die ökonomisch wichtigen Salmoniden konzentriert, gibt es wenig qualifizierte Angaben zur tatsächlichen maximalen Sprunghöhe anderer Fischarten. Die Kenntnisse beschränken sich auf wenige Laborversuche mit einzelnen Arten, die erfolgreiche Querung von Hindernissen bei Telemetriestudien und zufällige Beobachtungen. Die vorhandenen Angaben zu Sprunghöhen werden in Tabelle 4 aufgeführt. Bei Angaben aus Telemetriestudien handelt es sich dabei nicht um Maximalwerte, da die beobachtete Sprunghöhe durch die Höhe der vorhandenen Hindernisse im Untersuchungsgebiet bedingt ist. Angaben zur Flucht aus Fang- oder Hälterungseinrichtungen zeigen das physische Sprungvermögen der jeweiligen Fischart auf. Dies bedeutet jedoch nicht zwingend, dass diese Sprungkraft auch zur Hinderungsquerung während der Migration verwendet wird (z. B. Hecht).



Tabelle 4: Nachgewiesene Sprunghöhen verschiedener einheimischer Fischarten

Art	Lateinischer Name	Sprunghöhe	Art der Beobachtung	Referenz
Alet	<i>Squalius cephalus</i>	ca. 0.7 m	Flucht aus Fangeinrichtung	Eigene Beobachtung
Barbe	<i>Barbus barbus</i>	0.4 m	Hindernisquerung (Radiotel.)	(Lucas & Frear 1997)
Elritze	<i>Phoxinus phoxinus</i>	0.27 m	Laborversuch	(Holthe et al. 2005)
Hecht	<i>Esox lucius</i>	0.2 m	Hindernisquerung (Radiotel.)	(Ovidio & Phillipart 2002)
		ca. 0.7 m	Flucht aus Hälterung	Eigene Beobachtung
Rotaugen	<i>Rutilus rutilus</i>	0.4 m	Hindernisquerung (Radiotel.)	(Lucas et al. 1998)
Schneider	<i>A. bipunctatus</i>	ca. 0.5 m	Flucht aus Fangeinrichtung	Eigene Beobachtung
Trüsche	<i>Lota lota</i>	0.1 m	Laborversuch	(Gardunio 2014)

Fische ohne Sprunghöhen

ONEMA (2014, S. 69) klassifiziert folgende bei uns heimische Fischarten als nicht springende Arten: Aal, Alet, Apron (*Roi du Doubs*), Bachneunauge, Barbe, Blicke, Brachsmen, Egli, Elritze, Groppe, Gründling, Hasel, Hecht, Karpfen, Laube, Nase, Rhone-Streber, Rotaugen, Rotfeder, Schleie, Schmerle, Schneider, Steinbeisser, Stichling, Strömer, Trüsche und Zander. Wie ein Vergleich mit Tabelle 4 zeigt, gibt es für einige dieser Arten jedoch durchaus Literaturangaben zu erfolgreichen Sprüngen. So ist zum Beispiel der Alet ein Fisch, der durchaus hohe und sehr ausdauernde Sprungversuche unternimmt, um ein Hindernis zu überwinden. Welche Arten tatsächlich nicht springen können, ist also noch nicht ausreichend untersucht. Zumindest bei Fischen ohne Schwimmblase kann jedoch angenommen werden, dass sie Hindernisse nicht springend überqueren können. So ist bei der Groppe bekannt, dass sie trotz sehr hoher Schwimmgeschwindigkeit (zirka 1 m/s) nicht springt. Ohne Schwimmblase weist sie einen negativen Auftrieb auf und bleibt daher am Boden (Tudorache et al. 2008). Weitere Fische ohne Schwimmblasen sind der Apron (*Roi du Doubs*), Schmerlen und Welse.



4 Charakteristik von Hindernissen

4.1 Klassifizierung von Barrieren

Künstliche Hindernisse fragmentieren die Fließgewässer und wirken sich nachteilig auf die aquatische Ökologie aus, indem sie die Bewegungen von Fischen zwischen wichtigen Habitaten verhindern (Mobilitätshindernisse) und sich so negativ auf die Populationen auswirken (Lucas & Baras 2001). Als Hindernisse werden Bauwerke oder natürliche Strukturen in einem Gewässer definiert, welche von aufwandernden Fischen in der Regel nicht oder nur unter Schwierigkeiten überquert werden können. Die negativen Auswirkungen der Hindernisse können von kurzer Dauer sein (Verspätung der Wanderung), hin bis zu langfristigen Folgen mit einem kompletten Verlust gewisser Funktionen. Die Verhinderung von Fischbewegungen und Wanderungen kann dazu führen, dass Forellen von ihren Reproduktionsarealen abgeschnitten werden, was schwerwiegende Konsequenzen für den Fortbestand einer Population haben kann. Einige Barrieren sind für grössere und schwimmstärkere Fische durchlässig. Meist gelingt es aber schwimmschwachen Fischen oder juvenilen Forellen nicht, diese zu überqueren. Somit können sich diese Hindernisse negativ auf das Überleben auswirken. Habitatfragmentierung ist vor allem dann problematisch, wenn dadurch nur noch kurze miteinander vernetzte Bachabschnitte vorhanden sind, in denen sich isolierte und meist nur noch kleine Subpopulationen halten können. Die Entfernung von künstlichen Hindernissen wird denn auch gesetzesmässig (Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer) gefordert. Habitatvernetzungen sollen durch die Entfernung von Hindernissen wieder hergestellt und Isolationseffekte aufgehoben werden. Bei der Entfernung von Barrieren sollen durch Trittsteine mit entsprechenden Fischzönosen die Dichte der habitatspezifischen Arten erhöht werden. Eine Vernetzung von isolierten Strecken ist in der Regel sinnvoll, da sich die Biodiversität durch eine komplexere Habitatsstruktur und eine Erhöhung der genetischen Vielfalt in der Folge deutlich verbessert. Kleine, oft auch steile Fließgewässer werden in ihrer Bedeutung für die Reproduktion oder als Refugialhabitate der Bachforelle meist unterschätzt. Forellen verlassen oft grössere Gewässer und suchen kleine Seitengewässer für ihre Reproduktion auf (Baglinière & Maisse 2002) oder aber Jungfische wandern in kleine Seitengewässer ein, um dort geeignete Habitate aufzusuchen (Louison & Stelzer 2016). Aus diesem Grunde ist ganz speziell auf eine hindernisfreie Anbindung von kleinen Seitengewässern zu achten.

Auf Fischbewegungen bezogen lassen sich folgende dreizehn Barrieretypen unterscheiden (Kemp et al. 2008, verändert):

- 1. Natürliche Barrieren**
 - Wasserfälle und natürliche Abstürze
 - Dämme mit angeschwemmtem Holz, inkl. Biberdämme
- 2. Sohlswellen**

Wasserbauliche Konstruktionen mit einem Überfall
- 3. Sohlswellen für die Abflussmessung**

Überströmte, meist verbreiterte Einrichtungen zur Messung des Abflusses (Abflussmessstation)
- 4. Durchlässe/Eindolungen**

Bei Strassenüberführungen und im Siedlungs- oder Landwirtschaftsgebiet
- 5. Befestigungen bei Brücken**

Meist als Furten oder niedrige Schwellen konstruiert
- 6. Sohlrampen und Blockrampen**

Rampen mit hohem Gefälle, welche die Fischwanderung beeinträchtigen



7. Wehre

Stauwehre, Streichwehre, Tirolerwehre im Zusammenhang mit Wasserausleitungen

8. Schleusen

Verstellbare Strukturen zur Regulierung des Wasserabflusses, meist unter- oder überströmt

9. Dämme

Talsperren für hydroelektrische Nutzungen

10. Wasserausleitungen

Bauwerke zur Ausleitung von Wasser, welche nicht als Wehr konstruiert sind

11. Fischaufstiegshilfen (FAH)

FAH mit mangelhafter Funktionsfähigkeit, die als Barrieren wirken

12. Untiefen und Geschwindigkeitsbarrieren

Flache Stellen in einem Gewässer oder Areale mit sehr hoher Fließgeschwindigkeit

13. Geschiebesammler

Bauwerke im Bach, die das Gefälle reduzieren und im Querprofil einen Weiher bilden

Da jedoch nicht alle Barrieretypen in kleineren Fließgewässern auftreten, wird im Weiteren nur auf die für kleinere Gewässer relevanten Hindernisse detailliert eingegangen.

4.2 Häufige Barrieretypen in kleinen Fließgewässern und ihre Charakterisierung

Die Parameter zur Charakterisierung der Barrieren werden im Folgenden für die wichtigsten Typen aufgezählt und mit einem Foto dokumentiert.

Wasserfälle und natürliche Abstürze (Abbildung 5a)

- Höhe des Absturzes D_H
- Kolktiefe H_f , zirka 0.5 m vom Hindernis entfernt
- Tiefe am Kopf des Absturzes
- Winkel des Wasserfalls (geschätzt)
- Abfluss (geschätzt)
- Koordinate

Dämme mit angeschwemmtem Holz, inkl. Biberdämme (Abbildung 5b und c)

- Höhe des Absturzes D_H
- Kolktiefe H_f
- Tiefe am Kopf des Absturzes
- Abfluss (geschätzt)
- Koordinate

Sohlschwellen, inkl. Schwellen für die Abflussmessung (Abbildung 5d – f)

- Höhe des Absturzes D_H
- Kolktiefe H_f
- Tiefe am Kopf des Absturzes
- Abfluss (geschätzt)
- Koordinate



Durchlässe/Eindolungen (Abbildung 5g und h)

- Durchlasstyp
- Länge
- Fließgeschwindigkeit
- Tiefe der Wassersäule
- Substratcharakterisierung
- Höhe D_H und Kolkentiefe H_f des unterwasserseitigen Absturzes, falls vorhanden
- Angaben zum Vorhandensein von Licht (Lichtfenster/Beleuchtung)
- Art und Abmessungen von Einbauten (*baffles*), falls vorhanden
- Koordinate

Befestigungen bei Brücken (Abbildung 5i)

- Höhe des Absturzes D_H , falls vorhanden
- Kolkentiefe H_f
- Tiefe am Kopf des Absturzes
- Charakterisierung der Gewässersohle unter der Brücke
- Abfluss (geschätzt)
- Koordinate

Sohl- und Blockrampen (Abbildung 5j)

- Rampentyp
- Länge der Rampe
- Gefälle
- Abfluss (geschätzt)
- Koordinate

Wasserausleitungen (Abbildung 5k)

Bauwerke zur Ausleitung von Wasser, welche nicht als Wehr konstruiert sind und als Wanderhindernisse wirken.

- Art der Barriere
- Angabe der Tiefen
- Zweck der Wasserausleitung
- Koordinate

Geschiebesammler (Abbildung 5l)

Bauwerke im Bach, die das Gefälle reduzieren und im Querprofil eine weiherartige Erweiterung bilden, sind für einige Fischarten als Wanderhindernisse einzustufen. Je nach Ausbildung sind sie nicht vollkommene Barrieren, aber sie beeinträchtigen die Fischbewegungen in einem starken Ausmass. Bodenorientierte Fische (z. B. Groppen) durchschwimmen weiherartige Strukturen in einen Fließgewässer nur zögerlich.

- Länge
- Sohlenstruktur
- Angaben zu Abstürzen (ober- und unterwasserseitig), falls vorhanden
- Koordinate



Untiefen und Geschwindigkeitsbarrieren (Abbildung 5m)

Wenn die Tiefe einer Fließstrecke geringer ist als die Körperhöhe des Fisches oder wenn die Fließgeschwindigkeit die Sprintgeschwindigkeit (maximales Schwimmvermögen) der vorkommenden Fischart übertrifft, kann von einem Barriereneffekt gesprochen werden.

- Länge der Untiefe resp. des Areals mit hoher Fließgeschwindigkeit
- Wassertiefe
- Fließgeschwindigkeit
- Bachbett natürlich/künstlich
- Koordinate

Fischaufstiegshilfen (FAH; Abbildung 5n)

Fischaufstiegshilfen mit mangelnder Funktionsfähigkeit wirken als Wanderbarrieren.

- Typ der Aufstiegshilfe (Beckenpass, Schlitzpass etc.)
- Länge der FAH
- Offensichtliche Mängel im Unterhalt (Verstopfungen)
- Angaben zum Kraftwerk, falls vorhanden
- Koordinate

Wehre (Abbildung 4)

- Art des Wehrs
- Höhe des Wehrs
- Kolkentiefe H_f
- Lichte Stabweite bei Tirolerwehr
- Abfluss geschätzt
- Koordinate



Abbildung 4: Verschiedene Wehrtypen. Von oben links: Schlauchwehr; Tirolerwehr zum Einzug von Wasser; Betonwehr zur Wasserausleitung; Streichwehr an einem grösseren Fließgewässer (Limmat)



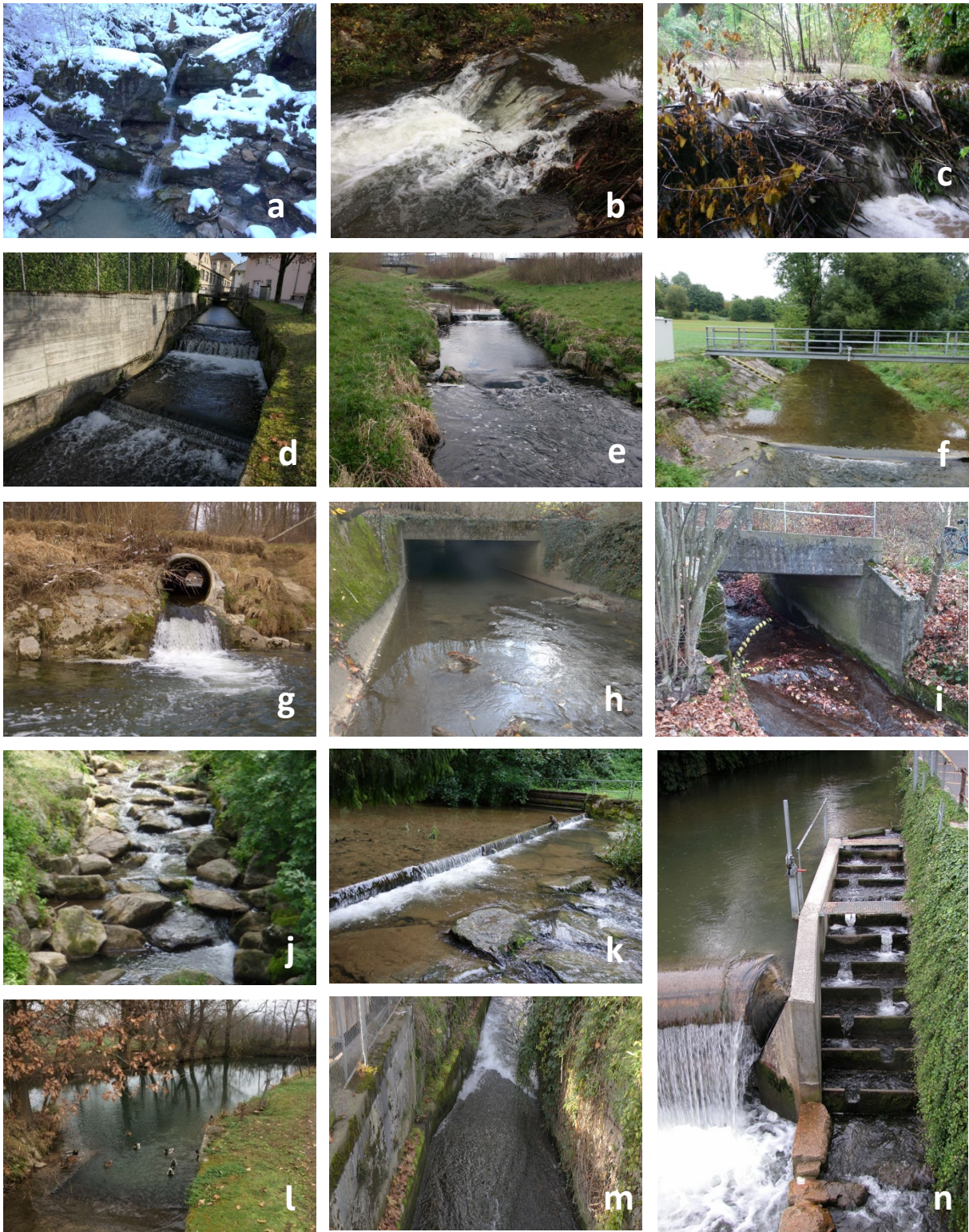


Abbildung 5: Häufige Barrieren in kleinen Fließgewässern. a: Natürliche Abstürze in einem steilen Forellengewässer; b und c: Kleiner (b) und grosser (c) Biberdamm; d bis f: Sohlschwellen in einem Kanal (d), einem Bach und bei einer Abflussmessstation (f); g und h: Durchlass als Verrohrung mit Absturz (g) und als Rahmenprofil ohne Absturz (h); i: Sohlenbefestigung bei einer Brücke; j: Aufgelöste unstrukturierte Blockrampe im Dorfbach Oftringen mit einer Länge von 16 m, Gefälle 6 %. Erfolgreiche Passagen wurden für die Bachforelle nachgewiesen (Weibel et al. 2012); k: Wasserausleitung in einen Seitenkanal mit Befestigung der Sohle; l: Geschiebesammler; m: Barriereneffekt in einem Kanal, verursacht durch eine betonierte Rampe, über welche das Wasser nur mit einer Tiefe von wenigen Zentimetern fliesst; n: Fischaufstiegshilfe, welche aktuell gültige Kriterien einer Aufstiegshilfe nicht mehr erfüllt (diese Anlage wurde inzwischen durch eine neue FAH ersetzt).



4.3 Einschätzung der Passierbarkeit

An jeder Barriere soll die Passagemöglichkeit für Forellen und andere Fischarten abgeschätzt werden. Folgende Kategorien werden für die Abschätzung vorgeschlagen:

1. Vollständige Barriere, unüberwindbar für Fische
2. Passagemöglichkeit stark beeinträchtigt
3. Passagemöglichkeit leicht beeinträchtigt
4. Barriere ist passierbar für Fische, keine Beeinträchtigung

Diese Einschätzung kann auch dabei helfen, Priorisierungen für die Entfernung von Barrieren vorzunehmen.

Jede Barriere lässt sich mit wenigen Eigenschaften charakterisieren und einem Typ zuordnen. Zusätzlich ist abzuschätzen, ob eine Barriere vollkommen unüberwindbar oder teilweise oder völlig für Fische passierbar ist.



5 Fischgängigkeit in Durchlässen

5.1 Charakterisierung von Durchlässen

Als Durchlässe werden lineare Kreuzungsbauwerke (i. d. R. von Verkehrswegen) in geschlossener Bauweise ohne eigene Tragekonstruktion bezeichnet. Im Gegensatz zu Brücken kann die Längsausdehnung in Fließrichtung grösser und der Abflussquerschnitt unter Umständen erheblich eingeschränkt sein. Je nach Querschnittsform wird zwischen Rohrdurchlässen, Rahmendurchlässen und Sonderformen (z. B. Maulprofil) unterschieden (DWA 2014). Eine zusätzliche Klassifizierung erfolgt durch die Unterscheidung zwischen Durchlässen mit nach unten offenem oder geschlossenem Profil (Abbildung 16). In Rohrdurchlässen ist die Fließgeschwindigkeit durch den geringeren Querschnitt generell höher als in Rahmen- oder offenen Durchlässen. Dafür ist die Mindestwassertiefe höher, was in Perioden mit tiefem Abfluss von Vorteil sein kann. Die Bedingungen in einem Durchlass werden jedoch immer auch vom Gefälle, der Abflussmenge und der Sohlenstruktur bestimmt.

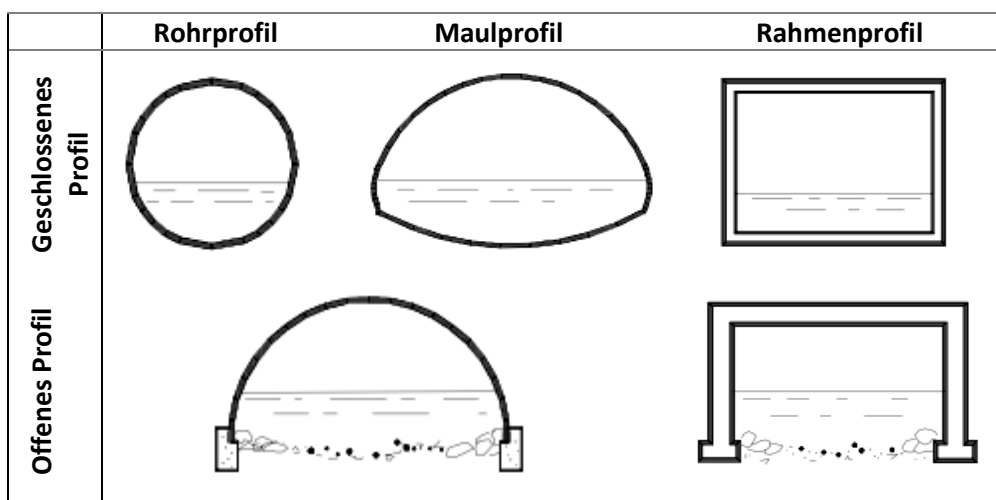


Abbildung 6: Verschiedene Durchlasstypen (verändert nach Katopodis 1993)

5.2 Durchlässe als Passagehindernis

Verschiedene Studien zeigen, dass die Passagewahrscheinlichkeit von Fischen durch Durchlässe signifikant kleiner sein kann als durch natürliche Referenzstrecken (Burford et al. 2009; Coffman 2005; Mahlum et al. 2014; Warren & Pardew 1998). Folgende Faktoren können dazu führen, dass ein Durchlass als Wanderhindernis für aufsteigende Fische wirkt (Bates et al. 2003; Boubée et al. 1999; Burford et al. 2009; DWA 2014; Katopodis 1993; Lang et al. 2004; Larinier 2002):

- Hohe Fließgeschwindigkeiten
- Geringe Wassertiefe
- Absturz am Auslass, geringe Wassertiefe im Kolk
- Hohe Turbulenzen und abrupte Fließwechsel (Wechselsprung)
- Länge
- Fehlende Sohle bzw. Ruheplätze / homogene Bedingungen
- Ablagerung von Holz, Geröll oder Sediment

Dabei bestehen verschiedene Interaktionen zwischen den einzelnen Faktoren. Ausserdem müssen die hydraulischen Bedingungen (Tiefe, Fließgeschwindigkeit) während verschiedenen Abflüssen (je nach Migrationsperiode) für die Passage geeignet sein (Katopodis 1993).



5.3 Gestaltung fischgängiger Durchlässe

Für die Planung von fischpassierbaren Durchlässen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Der Durchlass kann nach Vorbild des Gewässers (*Stream simulation design*) oder nach den Anforderungen der vorkommenden Fischarten und Grössenklassen (*Hydraulic design*) dimensioniert werden. Bei der «*Stream simulation*»-Methode werden Durchlässe mit einer Sohle ausgestattet, welche die Gewässermorphologie (Breite, Gefälle, Substratgrössen) imitiert. Bei der «*Hydraulic design*»-Methode werden zuerst Grenzwerte für Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Absturzhöhe je nach Zielfischarten festgelegt. Anschliessend wird der Durchlass entsprechend dimensioniert.

Der Bau von Rohrdurchlässen mit Einbauten («*baffles*») ist grundsätzlich nicht erwünscht, da sie die Kapazität eines Durchlasses um bis zu 55 % vermindern können, den Wartungsaufwand vergrössern und oft zu hohen Turbulenzen führen (Baker & Votapka 1990; Larinier 2002; Rajaratnam et al. 1988). Auch gibt es bisher keine festgelegte Bestvariante für die Form der Einbauten und bei den verschiedenen Systemen gibt es nur wenig Erkenntnisse über die biologische Wirksamkeit (DWA 2014).

5.3.1 Stream Simulation Design

Mit dieser Methode werden Breite, Tiefe, Gefälle, Fließgeschwindigkeit und Sohle des Fließgewässers im Durchlass erhalten. Alle Fische, die das natürliche Gewässer durchwandern, sind somit grundsätzlich auch in der Lage, den Durchlass zu passieren. Dies wird über die grosse Breite des Durchlasses (1.2-faches der Breite des natürlichen Bachbetts plus 0.6 m) erreicht. Die Methode ist grundsätzlich für alle Gefälle und Längen geeignet, wobei für Gewässer mit einem Gefälle über 6 % noch sehr wenig Erfahrungen vorliegen. Im einfachsten Fall wird ein offener Rahmendurchlass über das bestehende Bachbett gebaut (Abbildung 17). Da die Bedingungen dem restlichen Gewässer entsprechen, braucht es keine fundierten Kenntnisse über die Schwimmfähigkeit und Wanderperioden der Zielarten sowie die Hydrologie des Gewässers. Die Durchgängigkeit ist auch für aquatische Invertebraten (flussaufwärts), sowie Sedimente und Geschwemmsel (flussabwärts) gegeben und die «ökologische Durchgängigkeit» bleibt erhalten (Bates et al. 2003).

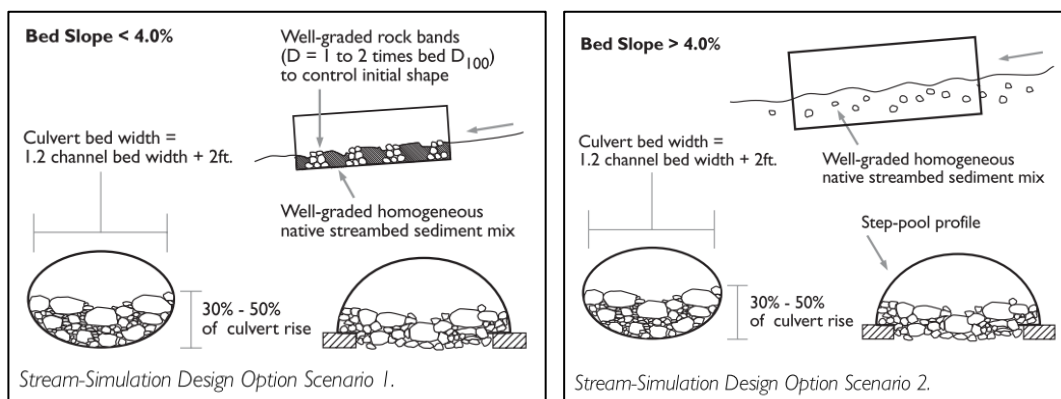


Abbildung 7: Bemessung von Durchlässen nach der «*Stream Simulation*»-Methode. Bei flacheren Gewässern wird der Einbau von Querriegeln empfohlen, um die Niederwasserrinne in der Mitte des Durchlasses zu halten und Erosion entlang der Seiten zu vermeiden (links). Graphik aus Bates et al. (2003)



5.3.2 Hydraulic Design Option

Beim «*Hydraulic Design*» werden die Bemessungswerte anhand der Zielfischarten festgelegt. Zuerst wird die Länge des Durchlasses anhand der geplanten Strassenkonstruktion, sowie die Zielart(en) und Grössenklassen festgelegt. Deren Schwimffähigkeiten bestimmen die maximal zulässigen Fließgeschwindigkeiten je nach Länge des Durchlasses, ihre Grösse und Form die minimale Wassertiefe (Abbildung 18). Der Durchlass muss so dimensioniert werden, dass diese Zielwerte zur Wanderzeit der Zielfischarten erreicht werden (Bates et al. 2003; Lang et al. 2004).

Die Schwierigkeit dieser Methode liegt in der richtigen Festlegung der Bemessungskriterien. Im Gegenzug zur «*Stream Simulation*» sind umfangreiche Kenntnisse über die im Gewässer vorkommenden Fischarten, deren Schwimffähigkeiten und Wanderperioden sowie die Hydrologie des Gewässers notwendig. Die «*Hydraulic Design*»-Methode ist für Jungfische tendenziell weniger geeignet, da Limitierungen von tiefen Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen oft nicht eingehalten werden können (Bates et al. 2003).

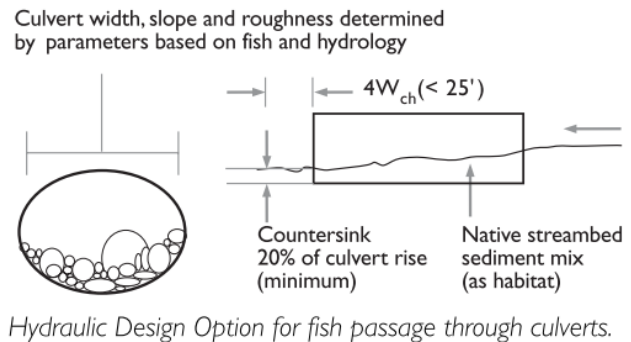


Abbildung 8: Bemessung von Durchlässen nach der «*Hydraulic Design*»-Methode. Graphik aus Bates et al (2003)

Noch immer bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der Ansprüche verschiedener Arten und Grössenklassen für die Fischgängigkeit von Durchlässen. Wenn möglich sollten Durchlässe deshalb nach der «*Stream Simulation*»-Methode geplant werden. Indem die morphologischen und hydraulischen Bedingungen des natürlichen Gewässers beibehalten werden, können alle im Gewässer vorkommenden Fischarten den Durchlass passieren.

5.4 Literaturwerte und Empfehlungen für diverse Parameter

Es gibt nur wenige quantitative Studien, die den Einfluss konkreter Parameter auf die Passageraten von Durchlässen untersuchen (z. B. Burford et al. 2009; Goerig et al. 2015, beide für Nordamerikanische Salmoniden). Reine Aufstiegszählungen (z. B. Schwevers et al. 2004) können zwar nachweisen, dass ein Durchlass grundsätzlich passierbar ist, geben jedoch keine Auskunft darüber, wie viele Fische erfolglos blieben. Da zudem jeder Durchlass einzigartig ist, und die Durchgängigkeit von verschiedenen, miteinander interagierender und je nach Abfluss variabler Parameter abhängt, können keine allgemein gültigen Bemessungswerte aus der Forschung abgeleitet werden, welche die Durchgängigkeit für Bachforellen garantieren. Im Folgenden wird daher nur aufgezeigt, in welcher Art verschiedene Faktoren als Barrieren wirken, und welche Maximal- bzw. Minimalwerte sich bei Untersuchungen als passierbar erwiesen.

Zu erwähnen ist auch die Studie von Klima 2020, der im Obersiggingerbach bei Wasserfällen eine Untersuchung zur Fischgängigkeit durchführte. Dabei wurde ein Bachdurchlass mit einer integrierten Fischtreppe eingebaut. Die Rohrlänge betrug 29.4 m, der Rohrdurchmesser 1.43 m. Die Durchlassröhre wies eine Steigung von 7.4 % auf. Die Steigung wurde mit 24 Becken mit einem U-förmigen Überfallprofil überwunden. Zudem war ein natürliches Sohlsubstrat vorhanden. Anhand von Markerversuchen konnte nachgewiesen werden, dass der Durchlass für Bachforellen und Alet fischgängig war. 31 % der markierten Forellen stiegen über den Bachdurchlass auf, bei den Alet waren es 49 %.



5.4.1 Länge

Die Länge eines Durchlasses spielt vor allem dann eine Rolle, wenn homogene Bedingungen herrschen und die Fische den kompletten Durchlass in einem Anlauf überwinden müssen. Wie lange ein Fisch die zur Passage nötige Schwimmgeschwindigkeit aufbringen kann, hängt von seiner Leistungsfähigkeit sowie von der Wassertemperatur ab (Vgl. Kapitel 4.2). Ermüdet der Fisch im Durchlass, und gibt es keine Ruhemöglichkeiten, wird er immer wieder nach unten abgeschwemmt (Abbildung 19).

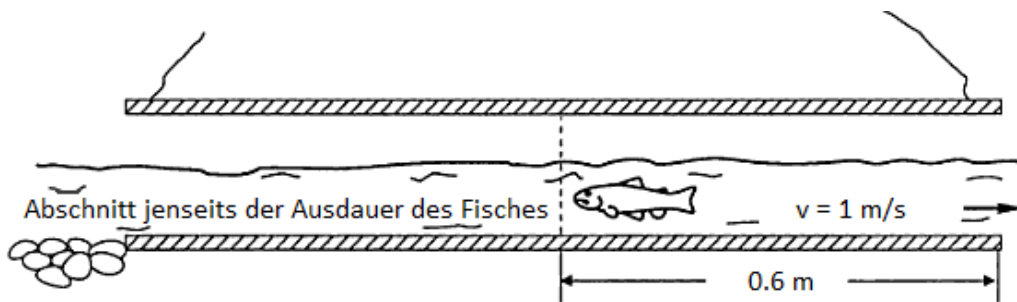


Abbildung 9: Länge und Fließgeschwindigkeit des Durchlasses bilden zusammen ein Hindernis (Vgl. Beispielrechnung in Kapitel 4.1; Bild: Gebhards & Fischer 1972, verändert)

Je kürzer ein Durchlass, umso kleiner die Wahrscheinlichkeit, dass er ein Geschwindigkeitshindernis darstellt. Auch aus Kostengründen, und um die Verbauung des Gewässers möglichst gering zu halten, sollte ein Durchlass daher immer so kurz wie möglich sein. Dabei darf seine Richtung jedoch nicht mehr als 30° von der des Bachbetts abweichen (Bates et al. 2003).

Bei Durchlässen unter 50 m wurde keine längenbedingte Barrierewirkung für Bachforellen (Schwevers et al. 2004) oder andere Salmoniden (Burford et al. 2009; Coffman 2005; Goerig et al. 2015) gefunden. Während Schwevers et al. (2004) zeigten, dass bei Durchlässen ab 50 m, trotz anderweitig günstigen Bedingungen, die Anzahl Passagen von Bachforellen deutlich abnahm, können grundsätzlich auch sehr lange Durchlässe erfolgreich passiert werden: Nachweislich passierten Bachforellen einen 95 m langen Durchlass (Belford & Gould 1989), Seeforellen gar einen 2.2 km langen Tunnel (Rogers & Cane 1979).

5.4.2 Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit kann in zwei Formen als Barriere wirken. Einerseits, wenn die maximale Fließgeschwindigkeit über der Sprintgeschwindigkeit (zirka 10-12 Körperlängen pro Sekunde über eine Zeitdauer von 10-20 Sekunden) der Fische liegt (punktuelleres Hindernis), andererseits wenn die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit in Durchlässen ohne Ruhemöglichkeiten über der gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit (zirka 50 % der Sprintgeschwindigkeit) der Fische liegt (Hindernis bedingt durch Länge und Fließgeschwindigkeit, Abbildung 19).

Erfolgreiche Durchlasspassagen wurden für Bachforellen bei Fließgeschwindigkeiten bis zu 1.7 m/s (Belford & Gould 1989; Schwevers et al. 2004) nachgewiesen. Während Burford et al. (2009) keinen Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf den Passageerfolg von Salmoniden fanden, zeigten Goerig et al. (2015) einen negativen Einfluss, insbesondere in Durchlässen mit glatter Sohle. Bei Schwevers et al. (2004) wiesen Durchlässe mit Fließgeschwindigkeiten von $< 1 \text{ m/s}$ die höchste Aufstiegsfrequenz auf. Sie folgern, dass die Durchgängigkeit ab 0.5 m/s mit zunehmender Fließgeschwindigkeit deutlich



«Stream Simulation»

Die maximale und durchschnittliche Fließgeschwindigkeit im Durchlass muss den entsprechenden Werten im umliegenden Gewässerabschnitt entsprechen.

«Hydraulic Design»

Die Fließgeschwindigkeit muss so ausgelegt werden, dass die Schwimmfähigkeit der im Gewässerabschnitt vorkommenden Arten und -größenklassen ausreicht, um die Länge des Durchlasses zu passieren. Für Bachforellen werden je nach Quelle unterschiedliche Maximalwerte gefordert (Vgl. DWA 2014, Kemp et al. 2008 und Bates et al. 2003). Grundsätzlich können die passierbaren Fließgeschwindigkeiten anhand der Tabelle 1 berechnet werden. Für andere einheimische Arten wurden bisher nur von Tudorache et al. (2008) Richtwerte publiziert (Tabelle 5).

Tabelle 5: Empfohlene maximale Fließgeschwindigkeit in Durchlässen für verschiedene Arten, anhand von Laborexperimenten (Tudorache et al. 2008). In Klammern wird die ungefähre Länge der untersuchten Fische angegeben.

Art	Lateinischer Name	Max. Fließgeschwindigkeit (m/s)
Groppe	<i>Cottus gobio</i>	0.61 (70 mm)
Gründling	<i>Gobio gobio</i>	0.92 (120 mm)
Schmerle	<i>B. barbatula</i>	0.62 (70 mm)
Bachforelle juv.	<i>Salmo trutta</i>	0.45 (80 mm)

abnimmt. Auch für Nicht-Salmoniden wurde eine negative Korrelation zwischen Fließgeschwindigkeit und Passageraten nachgewiesen (Warren & Pardew 1998).

5.4.3 Wassertiefe

Eine zu geringe Wassertiefe verhindert das Schwimmen im freien Wasserkörper. Durch Einschränkungen im Bewegungsablauf wird die Schwimmleistung der Fische beeinträchtigt und der Energieaufwand erhöht (Dönni et al. 2016).

Obwohl für die Fischgängigkeit in der Regel von einer nötigen Mindestwassertiefe des Wanderkorridors von $2.5 \times H_{\text{Fisch}}$ bzw. mindestens 20 cm ausgegangen wird (Dönni et al. 2016; DWA 2014), wurden Durchlasspassagen von Salmoniden bei weit kleineren Wassertiefen beobachtet. Schwevers et al. (2004) wiesen die Passage von Bachforellen mit einer Länge über 50 cm durch Durchlässe mit weniger als 10 cm Wassertiefe nach. Erst unter 7 cm erwies sich die kleine Wassertiefe als unpassierbar. Bei weiteren Salmoniden wurden sogar Passagen bei einer Wassertiefe unter 5 cm (Burford et al. 2009; Goerig et al. 2015; Mahlum et al. 2014) nachgewiesen. Auch bei Nicht-Salmoniden wurde bisher kein Einfluss der Wassertiefe auf die Passierbarkeit gefunden (Warren & Pardew 1998). Die bei uns geltenden Mindestwassertiefen für den Wanderkorridor scheinen daher grosszügig bemessen, was jedoch gewisser Randbedingungen wegen (z.B. Prädation, Verletzungen) sinnvoll ist. Kurze Strecken (bis zirka 5 m) können durchaus bei geringen Tiefen (zirka 10 cm) passiert werden.



«Stream Simulation»

Die minimale und durchschnittliche Wassertiefe im Durchlass muss den entsprechenden Werten im umliegenden Gewässerabschnitt entsprechen. Da sich das Wasser bei ungenügend strukturierter Sohle über eine grössere Breite ausdehnt, resultieren in «Stream Simulation»-Durchlässen oft geringere Wassertiefen als in natürlichen Referenzstrecken (Barnard et al. 2014). Bei Planung und Bau muss deshalb auf eine ausreichend deutliche Niederwasserrinne geachtet werden.

«Hydraulic Design»

Obwohl erfolgreiche Passagen auch bei geringeren Wassertiefen nachgewiesen wurden, sollte die Wassertiefe bei «Hydraulic Design»-Durchlässen den geltenden Mindestwerten für Wanderkorridore entsprechen. Diese beträgt in der Schweiz für Bachforellen die 2.5-fache Körperhöhe, bzw. mindestens 20 cm. In Einzelfällen kann die Wassertiefe bei Durchlässen von weniger als 5 m Länge das einfache der Körperhöhe, bzw. mindestens 7 cm, entsprechen (Dönni et al. 2016).

5.4.4 Gefälle

Das Gefälle beeinflusst einerseits die Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe in einem Durchlass und kann somit die oben beschriebenen Auswirkungen auf die Fischgängigkeit verursachen. Andererseits kann das Gefälle möglicherweise auch per se einen Einfluss haben. Die Gründe dafür sind noch nicht ausreichend untersucht. Da das Gefälle jedoch ein Mass für die Änderung der Höhe über eine gewisse Strecke darstellt, hängt es mit der Energie zusammen, die der Fisch zum Anheben seiner Masse aufwenden muss (Goerig et al. 2015).

Erfolgreiche Passagen von Salmoniden wurden bei bis zu 7.6 % Gefälle nachgewiesen, die Passierbarkeit kann jedoch je nach Art sehr unterschiedlich sein (Burford et al. 2009). Goerig et al. (2015) fanden einen negativen Einfluss des Gefälles auf die Passierbarkeit für Bachsaiblinge, wobei die Fischgängigkeit ab einer Steigung von 3 % stark abzunehmen scheint (Burford et al. 2009). Für Bachforellen gibt es noch sehr wenig Erkenntnisse. Für Durchlässe von bis zu 1.8 % Gefälle sind erfolgreiche Aufstiege nachgewiesen (Belford & Gould 1989), Bachforellen kommen jedoch auch in Fliessgewässern mit sehr viel grösserem Gefälle vor (Huet 1949).

Aus hydraulischen Gründen sollen Durchlassröhren mit dem gleichen Gefälle wie das natürliche Bachbett platziert werden. Bei steilerem Einbau erhöht sich die Fliessgeschwindigkeit und verkleinert sich die Wassertiefe. Bei flacherem Einbau kann sich ein Absturz am Auslass oder ein Wechselsprung am Einlass bilden (Fitch 1997).

5.4.5 Substrat

Eine natürliche Sohle vermindert durch die erhöhte Rauheit die Fliessgeschwindigkeiten in Durchlässen. Zudem können Strömungsschatten hinter grösseren Steinen kleine Ruheplätze für aufwandernde Fische bilden. Dadurch wird die maximal passierbare Strecke erhöht, die die Fische bei einer bestimmten Fliessgeschwindigkeit überwinden können. Eine natürliche Sohle ermöglicht zudem die Wanderung aquatischer Invertebraten.

Nur wenige Studien vergleichen Durchlässe mit und ohne natürliche Sohle. Durchlässe ohne Substrat werden von Bachforellen deutlich seltener passiert als solche mit natürlicher Sohle (Schwevers et al. 2004). Dies gilt auch für Nicht-Salmoniden (Warren & Pardew 1998). Die Durchwanderbarkeit wird also von einer durchgehender Substratschicht begünstigt. Bei Rohrdurchlässen ohne natürliche Sohle kann



die Durchgängigkeit (v. a. für kleine Fische) mit einer geriffelten Rohroberfläche verbessert werden (Goerig et al. 2015).

Durchlässe sind grundsätzlich immer mit einer natürlichen Sohle ausreichender Stärke auszustatten. Die Substratzusammensetzung sollte der des natürlichen Gewässers entsprechen. Zu bevorzugen sind nach unten offene Durchlassprofile über der natürlichen Sohle. Geschlossene Profile sollten zu mindestens 20 % («*Hydraulic Design*») bzw. 30-50 % («*Stream Simulation*») eingebettet werden (Bates et al. 2003).

5.4.6 Absturz am Auslass

Abstürze am Auslass von Durchlässen entstehen, wenn diese zu flach eingebaut und/oder nicht ausreichend eingebettet werden. Ob der Absturz überwunden werden kann, hängt von der Sprunghöhe des Fisches und dem unterwasserseitigen Kolk ab (s. Kap. 4.2).

Da Sprünge von Fischen meist nicht zielgerichtet erfolgen, kann ein Absturz am Auslass eines Durchlasses zu grossem Zeit- und Energieaufwand für die Passage führen (Lang et al. 2004). Bei Durchlässen kommt erschwerend dazu, dass die Fische nach einem erfolgreichen Sprung und bei hohen Fließgeschwindigkeiten in der Röhre wieder ausgespült werden können.

Auch wenn grössere Bachforellen Durchlässe mit Auslassabstürzen von 0.5 m grundsätzlich passieren können, scheint die Absturzhöhe ein entscheidender Faktor für die Durchgängigkeit zu sein. Die meisten Passagen wurden an Durchlässen ohne oder mit Abstürzen von max. 0.3 m registriert (Schwevers et al. 2004). In einer Studie mit 12 verschiedenen Durchlässen war es gar der einzige Faktor, der einen negativen Einfluss auf die Passagerate von juvenilen Salmoniden hatte (Burford et al. 2009).

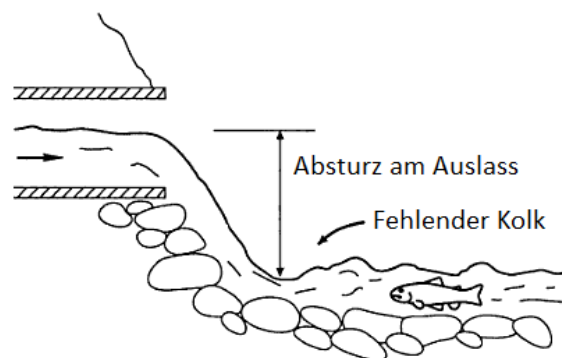


Abbildung 10: Auslassabsturz als Wanderhindernis (Gebhards & Fisher 1972, verändert)

Auch wenn kleine bis mittlere Abstürze von Bachforellen grundsätzlich überwunden werden können, sind sie bei Durchlässen unbedingt zu vermeiden. Zu viele Faktoren können einen erfolgreichen Sprung verhindern und die wiederholten Sprungversuche sind mit einem grossen Energieaufwand verbunden. Durchlässe müssen deshalb so konzipiert werden, dass kein Absturz entsteht (Lang et al. 2004). Nur eine durchgehende Sohle ermöglicht auch die Durchgängigkeit für sprungschwache Fische und Invertebraten.



5.4.7 Licht

Ob Licht eine entscheidende Rolle für die Passage spielt, wird kontrovers diskutiert. Grundsätzlich meiden Fische möglicherweise abrupte Helligkeitswechsel, wobei tagaktive Fische bei dunkeln Durchlässen besonders betroffen sind (Jones & Hale 2020). Bachforellen wandern zu allen Tageszeiten, bei kleinen Abflüssen (Rustadbakken et al. 2004) und tieferen Temperaturen (Heggenes et al. 1993) verschiebt sich ihre Aktivität aber vermehrt in die Nacht.

Nachweisbar werden auch lange dunkle Durchlässe von Salmoniden passiert (Belford & Gould 1989; Rogers & Cane 1979; Slatick 1970). Während einzelne Studien einen positiven Effekt von Beleuchtung auf die Passagerate und -dauer nachweisen konnten (Jones et al. 2017 für Australische Nicht-Salmoniden; Slatick 1970 für Regenbogenforellen), fanden andere keinen Effekt (Schwevers et al. 2004 für Bachforellen) oder gar schnellere Passagen bei dunkeln Durchlässen (Long 1959 für Regenbogenforellen). In einer neuen Studie von Adam et al. (2022) wurde die Reaktion von 600 Fischen auf Licht, Dunkelheit und Helligkeitskontraste untersucht. Neben einigen Cypriniden, Welsen und Aalen wurden auch Lachssmolts für die Untersuchung verwendet. Von den getesteten Fischen zeigte nur gerade der Wels Meidereaktionen gegenüber dem Licht. Die Autoren kommen zum Schluss, dass es nicht erforderlich ist, dunkle Wanderkorridore zu beleuchten. Auch hell beleuchtete Abschnitte stellen für die Fische keine Barriere dar.

Der Einfluss von Licht scheint für die Fischgängigkeit keine entscheidende Rolle zu spielen. Mit Gitterrosten oder Lichtschächten können jedoch natürlichere Lichtverhältnisse geschaffen werden. Auch eine grosse Durchlassbreite ermöglicht einen grösseren Lichteinfall und ein abrupter Wechsel wird vermieden. Uferbestockung erfüllt mit einer Beschattung des offenen Gerinnes den gleichen Zweck und kann zudem die Prädation auf zögernde Fische vermindern.



6 Fallstudie Fischgängigkeit Altholzbach

6.1 Allgemeines

Der Altholzbach entspringt oberhalb von Fahrwangen im Altholz auf einer Höhe von 602 m und fliesst nordwestlich Richtung Dorf Fahrwangen. Auf einer Höhe von 566.8 m ü. M. mündet er in den Dorfbach, welcher Fahrwangen durchfliesst und schliesslich in Meisterschwanden in den Hallwilersee (449 m. ü. M.) einmündet. Der Altholzbach fliesst im oberen Abschnitt teilweise durch den Wald und weist dort ein hohes Gefälle von rund 81 ‰ auf. Dieser Abschnitt gehört somit zur oberen Forellenregion. Der Altholzbach weist eine interessante Fischfauna auf, welche hauptsächlich aus Forellen besteht. Daneben kommen Elritze und Groppe vereinzelt vor. Der Bach ist weitgehend ein naturnaher Waldbach, im quellnahen Teil ist er jedoch im landwirtschaftlichen Umfeld begradigt. Um die Fischgängigkeit zwischen dem oberen Teil mit dem Weiher und dem unteren Abschnitt des Altholzbaches zu gewährleisten, wurde im Jahre 2021 ein Bauwerk errichtet, welches aus 28 Treppenstufen besteht. Die durchschnittliche Absturzhöhe von Stufe zu Stufe beträgt 16 cm (Bereich 12-20 cm). Die Becken weisen eine mittlere Tiefe von 40 cm auf (Bereich 33-49 cm). Die mittlere Breite der Becken beträgt 211 cm, die mittlere Länge 71 cm. Die Schlitzbreite zwischen den Steinblöcken beträgt 10-20 cm (Mittelwert 14 cm).

Um die Fischgängigkeit über dieses steile Bauwerk abzuklären, wurde im September 2022 ein PIT-Tagging Versuch mit Bachforellen durchgeführt.

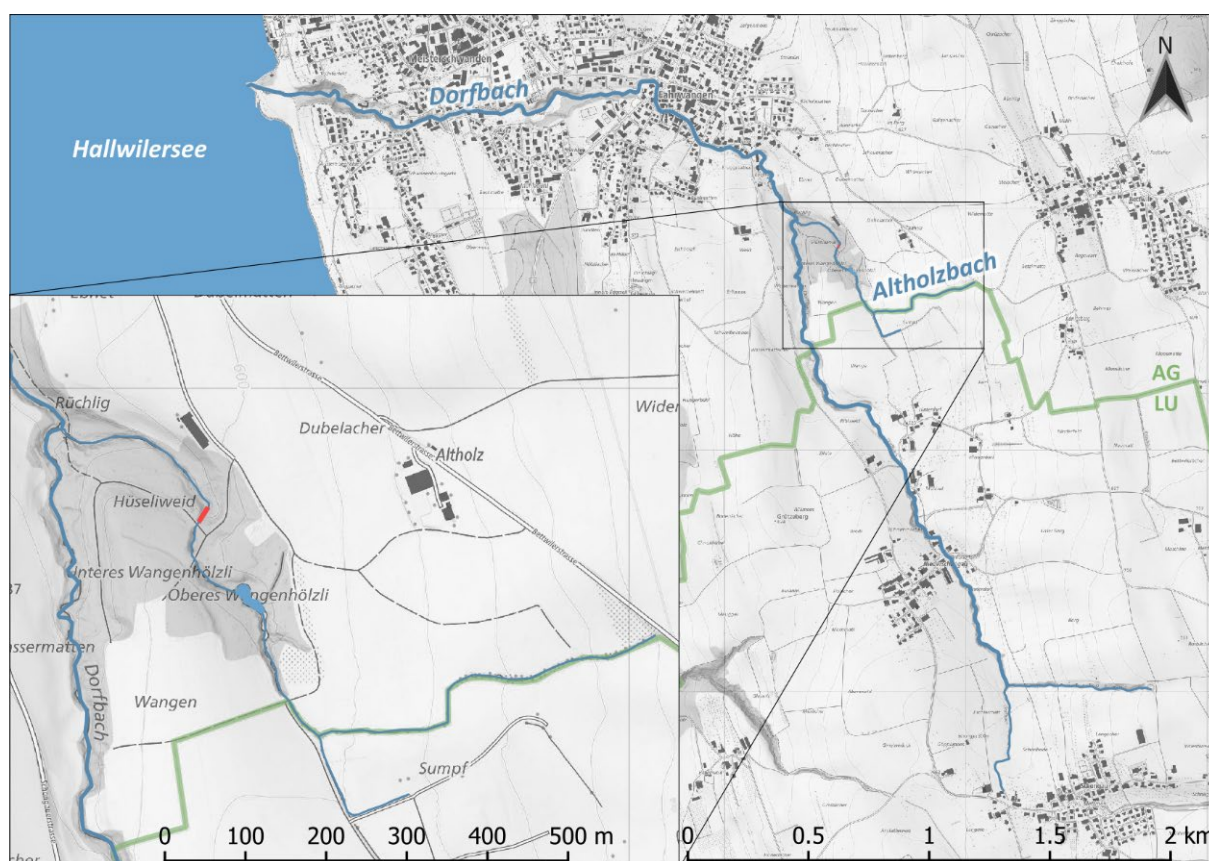


Abbildung 11: rechts: Der Dorfbach in Fahrwangen mit dem Altholzbach als Zufluss. Links: Kartenausschnitt Altholzbach mit der Lage der Fischaufstiegshilfe in rot. Kartengrundlage: Bundesamt für Landestopografie Swisstopo





Abbildung 12: Bauwerk zur Längsvernetzung mit 28 Treppenstufen (links: Bild vom 25.11.2022 bei Niederwasser, rechts: Bild vom 29.9.2022 bei erhöhter Wasserführung mit Überströmung der Blöcke). Oberhalb des Bauwerkes fliesst der Bach durch einen kurzen Durchlass (Strassenüberführung).

6.2 Fang und Markierung der Fische

Am 15.9.2022 und 22.9.2022 wurden oberhalb und unterhalb des Bauwerkes elektrische Befischungen durchgeführt. Die untere Befischungsstrecke erstreckt sich von 80 m unterhalb der Treppe (2'661'426/1'237'914) bis zum Bauwerk (2'661'479/ 1'237'854). Die Strecke oberhalb der Fischaufstiegshilfe (FAH) erstreckte sich vom oberen Ende des Bauwerks bis zum Weiher und vom Weiher bis zum Weg (je 112 m, zusammen 224m; 2'661'462/1'237'827 bis 2'661'575/1'237'615). Tabelle 7 gibt einen Überblick über die gefangenen und markierten Bachforellen.

Tabelle 6: Fangübersicht über die beiden Befischungen. Total wurden 41 Bachforellen gefangen und markiert.

Datum	Fang oberhalb FAH	Fang unterhalb FAH	Total Fische
15.09.2022	16	12	28
21.09.2022	13	-	13
Total	29	12	41

Die Fische wurden mit PIT-Tags markiert. Die kleinen Forellen bis 110 mm wurden mit einer 12 mm PIT-Tag Marke, die grösseren Fische mit einer 14 mm Marke markiert. Bei den PIT-Tags handelt es sich um HDX Marken mit ISO11784/11785 Registrierung (konforme ICAR-registrierte Tiermarken). Die 12 mm Marke weist einen Durchmesser von 2.1 mm und ein Gewicht von 0.1 g auf, die 14 mm Marke einen Durchmesser von 3 mm und ein Gewicht von 0.25 g. Abbildung 24 zeigt das Längenfrequenz-Histogramm der markierten Forellen.



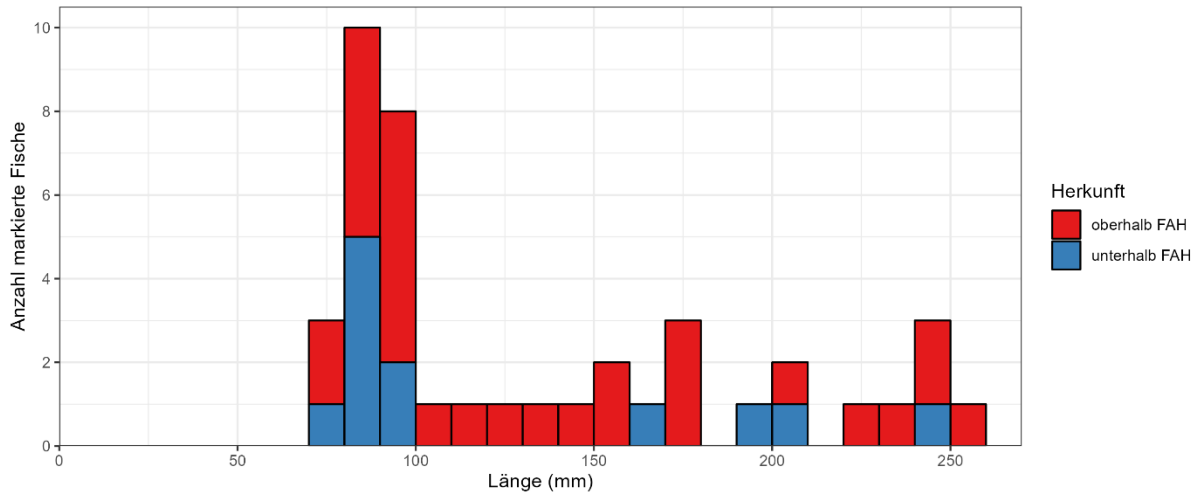


Abbildung 13: Längenfrequenz-Histogramm der markierten Forellen

Sämtliche markierten Fische wurden nach der Erholung aus der Narkose noch für 1-2 Stunden gehältert und dann unterhalb der Fischtreppe im Rampenkolk ausgesetzt. Da oberhalb der Rampe nur 29 Individuen gefangen werden konnten, wurden zusätzlich 12 Forellen aus der Strecke unterhalb des Bauwerkes gefangen und markiert. Insgesamt wurden 41 Forellen mit PIT-Tags markiert.

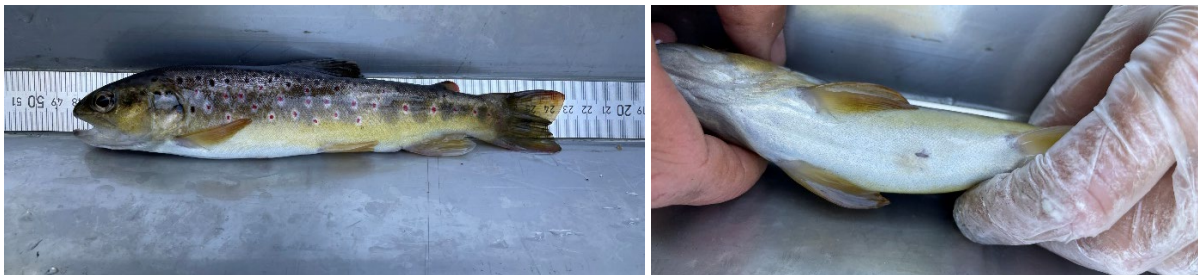


Abbildung 14: links: Bachforelle aus dem Altholzbach mit einer Länge von 25 cm, rechts: kleiner Schnitt mit dem Skalpell zur Öffnung der Bauchhöhle. Über diesen Schnitt wird der PIT-Tag eingeführt.

6.3 PIT-Tag Anlage

Zur Analyse des Aufstiegs geschahen wurden drei Antennen eingesetzt. Die unterste Antenne (A3) im untersten Kolk der Aufstiegshilfe, die mittlere Antenne (A2) im obersten Kolk, die oberste Antenne (A1) oberhalb des an die Fischtreppe anschließenden Durchlasses. Die drei Antennen wurden mit einem Multiplexer-Lesegerät der Marke Oregon RFID betrieben. Die Stromversorgung erfolgte über eine 12 V Batterie. Das ganze Equipment war wettergeschützt in einer Kiste untergebracht. Die Anlage war vom 15.09.2022 bis am 05.01.2023, also 111 Tage lang, in Betrieb. Die Wartung und Funktionskontrolle des Lesegerätes und der Antennen erfolgte in regelmässigen Abständen. In der Zeitperiode zwischen 17.09.2022 und 31.10.2022 traten beim Reader an einigen Tagen Probleme auf. In dieser Zeit wurden eventuell nicht alle aufsteigenden Fische registriert. Aus diesem Grunde wurde am 31.10.2022 zusätzlich ein manuelles Tracking in der elektrisch befischten Strecke (Befischungen vom 15. und 21.09.2022) durchgeführt.



6.4 Resultate Fischaufstieg

Von den 41 markierten Fische sind 18 Fische aufgestiegen (44 %). 13 Fische wurden auf den oberen Antennen (A2 und/oder A1) registriert. Fünf Fische wurden auf diesen Antennen nicht registriert, jedoch anlässlich des manuellen Trackings vom 31.10.2022 oberhalb des Bauwerkes detektiert. Drei Fische wurde nie mehr registriert, weder auf den Fixantennen noch beim manuellen Tracking. 20 Fische sind nicht aufgestiegen. Von ihnen wurden neun Individuen jedoch auf der untersten Antenne (A3) detektiert. Von den 12 markierten Fischen aus der Strecke unterhalb des Hindernisses sind sechs Individuen aufgestiegen (siehe Abbildung 15: Herkunft unterhalb FAH).

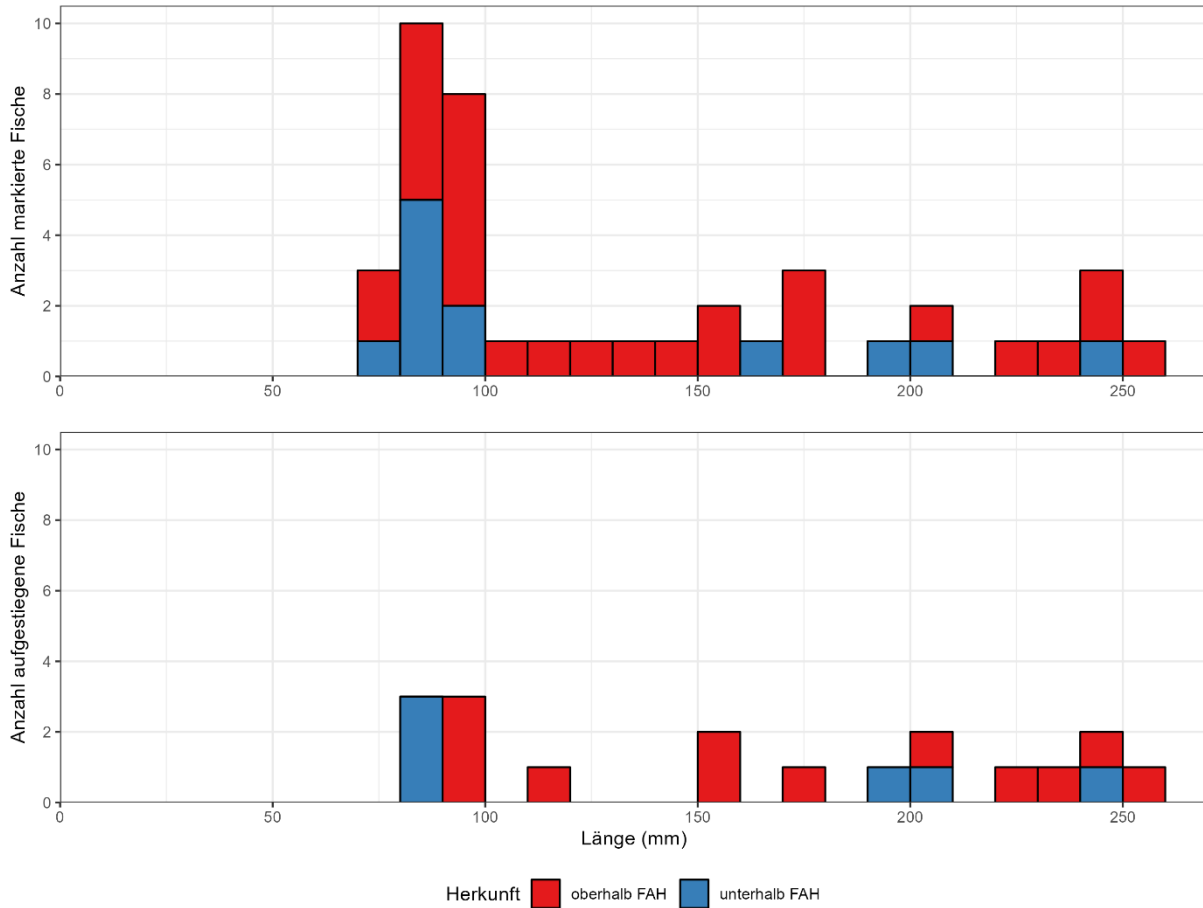


Abbildung 15: Histogramm der markierten Forellen (oben) und der über die Fischtreppe aufgestiegenen 18 Forellen (unten)



Der Aufstieg setzte relativ bald nach dem Aussetzen unterhalb der Aufstiegshilfe ein. Dies ist auch aus Abbildung 16 ersichtlich.

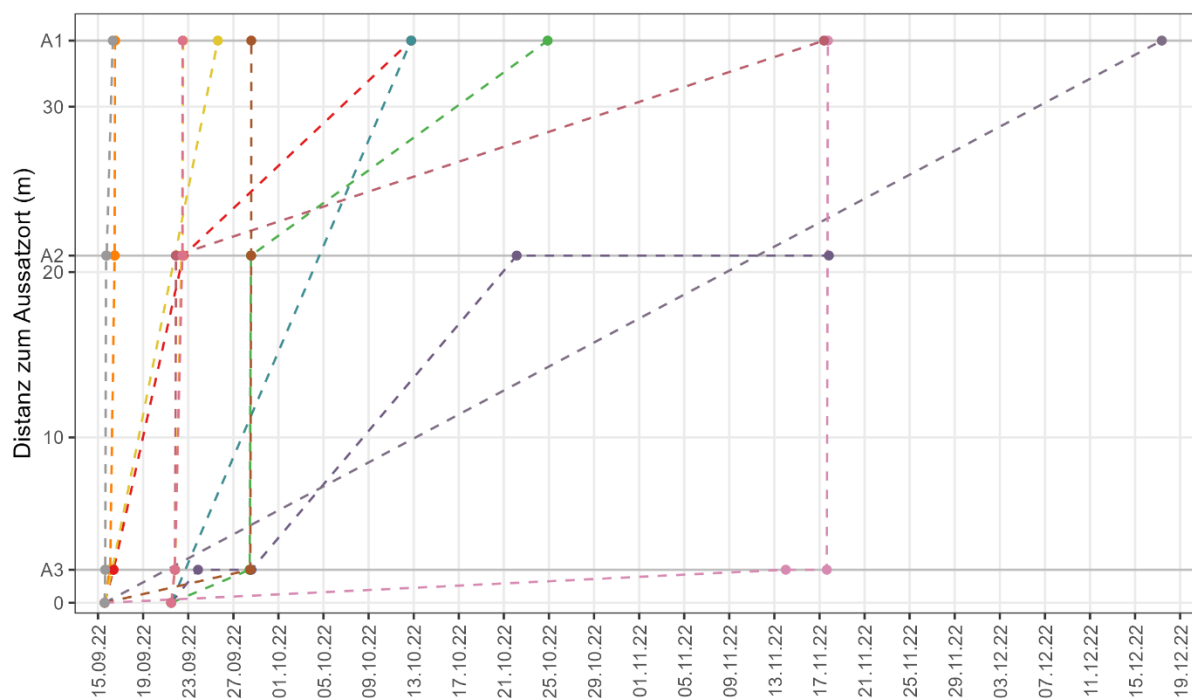


Abbildung 16: Aufstiege im Zeitverlauf. In dieser Abbildung sind auch Fische berücksichtigt, die auf einzelnen Antennen fehlen. Zudem sind die beiden Gruppen mit dem Aussetzdatum vom 15.9.2022 und 21.9.2022 erkennbar. Dargestellt ist immer die erste und die letzte Detektion auf einer Antenne (ausser bei der Antenne 1, bei welcher nur die erste Detektion berücksichtigt wird).

6.4.1 Benötigte Zeit für den Aufstieg

Die benötigte Zeit für den Aufstieg vom untersten bis zum obersten Becken (A3-A2) ist in Tabelle 8 ersichtlich. Der Medianwert gibt an, dass die Forellen für diese Passage durchschnittlich 9.5 h benötigen. Die schnellste Forelle (Totallänge 227 mm) schaffte den Aufstieg in 106 Minuten. Die Passage des Durchlasses (von Antenne 2 zu Antenne 1) ist nur eine kurze Strecke. Anscheinend steigen die Fische jedoch nach der Passage des Bauwerkes nicht gleich weiter auf, sondern benötigen weitere 7 h für die Passage der Verrohrung.

Bei der Passage des Bauwerkes besteht ein Prädationsdruck durch den Fischreiher, welcher öfters im Bauwerk beobachtet werden konnte. Die Präsenz des Reiher kann eine Erklärung sein für die relativ langen Passagezeiten.

Tabelle 7: Benötigte Zeiten für den Aufstieg von Antenne 3 zu Antenne 2 und von Antenne 2 zu Antenne 1 in Minuten

Abschnitt	Minimum	1. Quartil	Median	Mittelwert	3. Quartil	Maximum
A3-A2	106	128	575	5068	956	33882
A2-A1	14	50	423	18835	31297	82734



6.4.2 Diurnaler Verlauf des Aufstiegs

Die Detektionszeiten der markierten Fische auf den unterschiedlichen Antennen können als Annäherung für die tageszeitliche Aktivität der Bachforellen des Altholzbaehes dienen. Abbildung 17 zeigt den diurnalen Verlauf (Tagesrhythmus) der Detektionen an den einzelnen Antennen. Es gibt gehäufte Bewegungen am Tag, jedoch verhalten sich die Forellen auch nachtaktiv. Die meisten Detektionen wurden im September kurz nach dem Aussetzen der Forellen beobachtet.

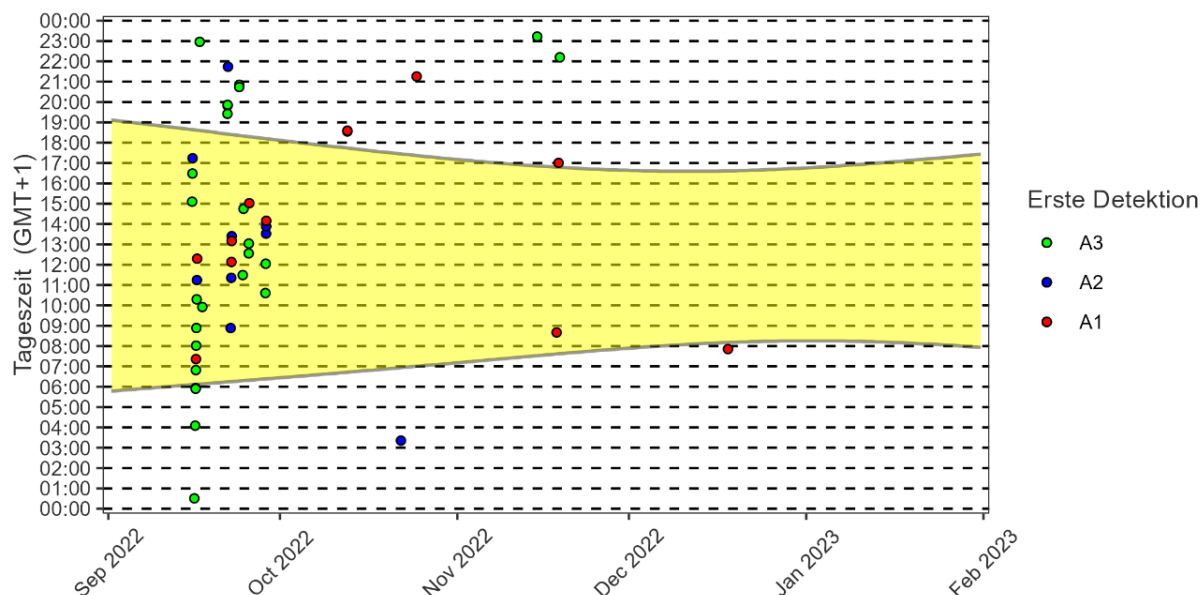


Abbildung 17: Diurnaler Verlauf der Detektionen auf den Antennen. A3: unterste Antenne, A2 mittlere Antenne am Ende des Bauwerkes, A1: Antenne nach dem Durchlass.

6.5 Fazit Altholzbach

Obwohl das Bauwerk aus 28 einzelnen Treppenstufen besteht, wurde es von der Bachforelle überwunden. Die mit PIT-Tag markierten Forellen stiegen relativ rasch nach dem Aussetzen auf. 44 % der markierten Fische sind aufgestiegen. Grössere Forellen (> 190 mm) stiegen erfolgreicher auf als kleinere Individuen. Der Aufstieg fand mehrheitlich am Tag, jedoch auch nachts statt. Der Bach weist mit 80 % ein sehr hohes Gefälle auf, die einzelnen Abstürze im Bauwerk haben mit einer maximalen Absturzhöhe von 20 cm aber eine moderate Höhe. Mit der gebauten Aufstiegshilfe war es möglich, die Vernetzung zwischen dem oberen und unteren Teil des Altholzbaehes in beiden Fliessrichtungen sicherzustellen. Im Altholzbaeh gibt es natürliche Hindernisse, die bei Niederwasser für Forellen nicht überwindbar sind. Bei höherem Abfluss stellt die Passage jedoch kein Problem dar.

Durch die offene Bauweise und die Lage in einer Lichtung sind die Bachforellen während der Passage der FAH einem erhöhten Prädationsrisiko durch den Graureiher ausgesetzt, der bei mehreren Gelegenheiten im Bauwerk beobachtet werden konnte. Es wird empfohlen die Ufer soweit möglich zu bestocken, um dessen Einfliegen zu erschweren. Die Schlitzte waren vor Beginn der Untersuchung mit Geschwemmsel verstopft, welches entfernt wurde. Um die Funktionsfähigkeit der FAH zu gewährleisten, muss diese regelmässig gewartet werden.



7 Fazit

Unter Anwendung der diskutierten Grundlagen für die maximalen Schwimmgeschwindigkeiten und Sprunghöhen lässt sich für jede Barriere oder jedes schnell fliessende Areal in einem steilen Gewässer entscheiden, ob die Struktur eine Fischbarriere darstellt. Bachforellen sind in der Lage steile Fließgewässerabschnitte zu durchschwimmen oder Hindernisse zu überspringen (Fallbeispiel Altholzbach). Die Passage für kleine Forellen ist in der Regel geringer als bei grossen Individuen. Bei der schwimmenden Passage sind die maximale Schwimmleistung sowie die vorhandene Wassertiefe wichtige Kriterien. Beim Überspringen eines Hindernisses spielen neben Fischgrösse (Körperlänge) und Temperatur auch die Tiefe des Sprungbeckens, die Höhe des Hindernisses sowie der Absprungwinkel des Fisches wichtige Rollen. Jedes Hindernis kann anhand der hier vorgeschlagenen Barrierentypen charakterisiert werden. Im Winter vermögen Fische weniger hoch zu springen (zirka nur 50 % hoch) als bei höheren Wassertemperaturen. Auch beim Durchschwimmen eines schnellfliessenden Areals beeinflusst die Wassertemperatur die Passierbarkeit.

Kleine und kleinste Fließgewässer haben für die Reproduktion der Bachforelle eine grosse Bedeutung und sollten, wenn immer möglich, ohne Barrieren für die Fische erreichbar sein. Aber auch als Refugialgewässer haben sie für kleinere Individuen ihre Bedeutung und werden aus dem Hauptgewässer her besiedelt. In Zeiten der Klimaerwärmung sollten Kleingewässer, welche als Kaltwassertemperaturrefugien dienen, barrierefrei erreichbar und über weite Strecken durchwanderbar sein.

Der vorliegende Bericht gibt keine detaillierten Empfehlungen zum Vorgehen, wie vorhandene Barrieren in durchwanderbare Strukturen umzuwandeln sind. Er trägt jedoch dazu bei, abzuschätzen, welches Hindernis sich auf die Durchwanderbarkeit der Fische auswirkt. Zudem kann er konkret bei der Entscheidungsfindung Hilfe leisten, welche Hindernisse künftig zu entfernen sind. Bei Planungen und Gewässerbau in kleinen Fließgewässern sollten unbedingt die hier vorgestellten Grenzwerte berücksichtigt werden.



8 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

Schwimmgeschwindigkeiten und Sprunghöhen der Fische entscheiden, ob ein Hindernis oder eine schnell fließende Stelle in einem Gewässer für einen Fisch passierbar ist. Beide Parameter hängen entscheidend von der Fischlänge, der Fischart und den Wassertemperaturen ab. Basierend auf wissenschaftlich publizierter Literatur und Büchern, aber auch auf Berichten, welche über das Internet zugänglich waren, wurden die wissenschaftlichen Kriterien zusammengetragen. Mit diesen Kriterien kann beurteilt werden, ob eine Barriere für die Forellen passierbar ist. In steilen Fließgewässern entscheidet also vor allem die nötige Wassertiefe, aber auch die maximale Schwimmgeschwindigkeit eines Fisches über die Möglichkeit einer bachaufwärts gerichteten Passage.

Videler (1993) definierte die maximale Schwimmgeschwindigkeit U_{\max} mit folgender Gleichung:

$$U_{\max} = 0.4 + 7.4 \cdot \text{Fischlänge in m}$$

Diese Gleichung gilt für Wassertemperaturen von ungefähr 10-15 ° C.

Wenn ein vertikales Hindernis den Weg versperrt (z. B. Wasserfall), kann ein Fisch versuchen, es zu überspringen. Die Sprungleistungen der Fische werden im Bericht vereinfacht und gut überschaubar zusammengefasst und mit empirisch ermittelten Werten ergänzt. Die erforderliche Tiefe (H_f) im Kolk, aus dem der Sprung erfolgt, kann mit der Formel \sqrt{DH} abgeschätzt werden, sofern das Wasser in einem Winkel von 90 ° in den Kolk fällt (DH entspricht der Höhe des Überfalls).

Ausgehend von der Videler-Gleichung werden sämtliche maximale Schwimmgeschwindigkeiten der Fische berechnet. Wie hoch ein Fisch springen kann, hängt neben Temperaturen und Körpergrößen auch vom Absprungwinkel ab. Fische springen jedoch meist mit einem Winkel von zirka 60 ° ab. Daher lassen sich die mittleren und maximalen Sprunghöhen aus Tabelle 2 ermitteln. So lässt sich abschätzen, ob eine Barriere von einem Fisch springend überwunden werden kann. Einige empirische Beobachtungen zeigen ein deutlich höheres Sprungvermögen als das mit Formeln berechnete. Die Berechnungen berücksichtigen eher Fische mit einem durchschnittlichen Sprungvermögen und nicht die wenigen Individuen, welche in der Lage sind, Höchstleistungen beim Überspringen von Hindernissen zu erbringen.

Es werden 13 unterschiedliche Barrieretypen unterschieden, mit denen sich die potenziellen Hindernisse beschreiben lassen. Dies sind:

- Natürliche Barrieren (Wasserfälle und natürliche Abstürze, Dämme mit angeschwemmtem Holz)
- Sohlswellen
- Sohlswellen für die Abflussmessung
- Durchlässe/Eindolungen
- Befestigungen bei Brücken
- Sohlrampen und Blockrampen
- Wehre
- Schleusen
- Dämme
- Wasserausleitungen
- Fischaufstiegshilfen (FAH)
- Untiefen und Geschwindigkeitsbarrieren
- Geschiebesammler



Die häufigsten Barrieretypen in steilen Fließgewässern werden beschrieben, charakterisiert und mit einem Bild vorgestellt. Für jede Barriere sollte schliesslich anhand ihrer Charakterisierung (Messgrößen) eine Einschätzung erfolgen, ob sie für Forellen teilweise oder überhaupt nicht passierbar ist.

Durchlässe

Die Fischgängigkeit von Durchlässen wird ausführlich dargestellt. Neben Forellen wird auch auf andere Fischarten eingegangen. Eine grobe Charakterisierung unterscheidet zwei Typen von Durchlässen: offene und geschlossene Profile. Durchlässe mit Einbauten (Baffles) sind grundsätzlich nicht erwünscht, da sich die Kapazität des Durchganges massiv vermindert und der Wartungsaufwand deutlich ansteigt. Durchlässe können nach der Methode des «*Stream Simulation Design*» oder des «*Hydraulic Design*» gebaut werden. Da grosse Unsicherheiten zu den Ansprüchen der verschiedenen Arten bestehen, sollten Durchlässe nach der Stream Simulation Methode gebaut werden.

Durchlässe sollten möglichst kurz sein und die Richtung sollte nicht mehr als 30° von der Richtung des Bachbettes abweichen. Die Fließgeschwindigkeit ist so anzulegen, dass die Schwimffähigkeit der vorhandenen Fischarten ausreicht, den Durchlass zu passieren. Es werden Richtwerte für die Abflussgeschwindigkeiten für die adulten und juvenilen Bachforellen, aber auch für andere Fischarten in der Forellenregion angegeben (Kap. 5.4.2). In Durchlässen muss auf eine ausreichende Niederwasserrinne geachtet werden. Die Wassertiefen sollten den geltenden Mindestwerten für Wanderkorridore entsprechen (2.5fache Körperhöhe des Fisches, bzw. 20 cm Tiefe). Erfolgreiche Passagen sind jedoch auch bei geringeren Tiefen nachgewiesen. Das Gefälle im Durchlass sollte dem natürlichen Gefälle des Baches entsprechen. Die Sohle ist natürlich auszugestalten. Bei Durchlässen mit einem Absturz ist die Absturzhöhe ein entscheidendes Kriterium für die Passage. Die höchste Anzahl von Fischpassagen wurde in Durchlässen ohne Abstürze oder bei Abstürzen von maximal 30 cm nachgewiesen. Dem Einfluss von Licht kommt gemäss neusten Erkenntnissen keine entscheidende Bedeutung zu.

9 Dank

Wir bedanken uns bei der Sektion Jagd und Fischerei des Kantons Aargau für die Unterstützung dieses Projekts. Ein ganz spezieller Dank geht an Dr. David Bittner (bis 2020) und Corinne Schmid, welche uns seitens der Auftraggeberin tatkräftig unterstützten.



10 Literatur

- Adam, B., Engler, O. & Lehmann, B. 2022. Zum Einfluss der Beleuchtung auf die Funktion von Fischaufstiegsanlagen und Kreuzungsbauwerken. *WasserWirtschaft*, 6:26-30.
- Amman, T. 2006. Der Einfluss von Barrieren auf die Verteilung von Fischen in kleinen Bächen: Fallstudien im Suhrental. Diplomarbeit ETH/Eawag: 75 S.
- Baglinière, J. L. & Maisse, G. 2002. La biologie de la truite commune (*Salmo trutta* L.) dans la rivière Scorff, Bretagne: une synthèse des études de 1972 à 1997. *INRA Prod. Anim.* 15, 5:319.331
- Beach, M.H. 1984. Fish pass design. Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep. 78: 45 S.
- Baker, C. O. & Votapka, F. E. 1990. Fish passage through culverts. U.S. Department of Transportation: 71 S.
- Bless, R. 1981. Untersuchungen zum Einfluss von gewässerbaulichen Massnahmen auf die Fischfauna in Mittelgebirgsbächen. *Natur und Landschaft*, 56:243–252.
- Barnard, R. J., Yokers, S., Nagygyor, A. & Quinn, T. 2014. An evaluation of the Stream Simulation Culvert Design Method in Washington State. *River Research and Applications*, 30:132–133.
- Bates, K., Barnard, B., Heiner, B., Klavas, J. P. & Powers, P. D. 2003. Design of road culverts for fish passage. Washington Department of Fish and Wildlife: 110 S.
- Belford, D. A. & Gould, W. R. 1989. An evaluation of trout passage through six highway culverts in Montana. *North American Journal of Fisheries Management*, 9 (4):437–445.
- Boubée, J., Jowett, I., Nichols, S. & Williams, E. 1999. Fish passage at culverts. A review, with possible solutions for New Zealand indigenous species. Department of Conservation: Wellington, N. Z.: 116 S.
- Burford, D. D., McMahon, T. E., Cahoon, J. E. & Blank, M. 2009. Assessment of trout passage through culverts in a large Montana drainage during summer low flow. *North American Journal of Fisheries Management*, 29 (3):739–752.
- Castro-Santos, T., Sanz-Ronda, F.J. & Ruiz-Legazpi, J. 2013. Breaking the speed limit — comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*:280–293.
- Coffman, J. S. 2005. Evaluation of a predictive model for upstream fish passage through culverts. James Madison University. Master Thesis: 104 S.
- Dönni, W., Boller, L. & Zaugg, C. 2016. Mindestwassertiefen für See- und Bachforellen - Biologische Grundlagen und Empfehlungen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt: 42 S.
- DWA 2014. Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: 334 S.
- Evans, W. A. & Johnston, B. 1980. Fish migration and fish passage: a practical guide to solving fish passage problems. Washington, DC: US Forest Service.
- Fitch, G. M. 1997. Avoidance of nonanadromous fish passage impedance caused by highway culverts. *Transportation Research Record*, (1559):34–41.



- Gallagher, A. S. 1999. Barriers. In Bain, M. B., Stevenson, N. J. Editors. Aquatic habitat assessment: common methods. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland: S. 135-147.
- García-Díaz, R., Manzano-Rodriguez, A. & García de Jalon, D. 2022. Transversal barrier heights that brown trout are able to overcome during migrations: Application to three mountain rivers of the Iberian peninsula. *Ecological Engineering*, 181:106686.
- Gardunio, E. I. 2014. Jumping and swimming performance of burbot and white sucker: implications for barrier design. Colorado State University. Master Thesis: 92 S.
- Gebhards, S. & Fisher, J. 1972. Fish passage and culvert installations. Idaho Fish and Game Department: 12 S.
- Goerig, E., Castro-Santos, T. & Bergeron, N. É. 2015. Brook trout passage performance through culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 73 (1):94–104.
- Heggenes, J., Krog, O. M. W., Lindas, O. R. & Dokk, J. G. 1993. Homeostatic behavioural responses in a changing environment: Brown Trout (*Salmo trutta*) become nocturnal during winter. *The Journal of Animal Ecology*, 62 (2):295–308.
- Holthe, E., Lund, E., Finstad, B., Thorstad, E. B. & McKinley, R. S. 2005. A fish selective obstacle to prevent dispersion of an unwanted fish species, based on leaping capabilities. *Fisheries Management and Ecology*, 12 (2):143–147.
- Huet, M. 1949. Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courants. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 11:333–351.
- Jens, G., Born, O., Hohlstein, R., Kämmereit, M., Klupp, R., Labatzki, P., Mau, G., Seifert, K. & Wondrak, P. 1997. Fischwanderhilfen: Notwendigkeit, Gestaltung, Rechtsgrundlagen. Offenbach am Main, Verband Deutscher Fischereiverwaltungsbeamter und Fischereiwissenschaftler e.V. Heft 11: 113 S.
- Jones, J. W. 1959. The salmon. Collins, London: 192 S.
- Jones, M. J., Baumgartner, L. J., Zampatti, B. P. & Beyer, K. 2017. Low light inhibits native fish movement through a vertical-slot fishway: Implications for engineering design. *Fisheries Management and Ecology*, 24 (3):177–185.
- Jones, M. J. & Hale, R. 2020. Using knowledge of behaviour and optic physiology to improve fish passage through culverts. *Fish and Fisheries*:1–13.
- Katopodis, C. 1993. Fish passage at culvert highway crossings. Präsentationsnotizen „Highways and the Environment“: 26 S.
- Kemp, P. S., Russon, I. J., Waterson, B., O'Hanley, J. & Pess, G. R. 2008. Recommendations for a “Coarse-resolution rapid-assessment” methodology to assess barriers to fish migration and associated prioritization tools – Final Report. International centre for ecohydraulic research, University of Southampton: 143 S.
- Klima, V. 2020. Funktionskontrolle Durchlass mit fischgängigem Innenausbau. Revitalisierung- und Hochwasserschutzprojekt Obersiggingerbach, Untersiggenthal. Projektbericht Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, Jagd und Fischerei. 16 S.
- Lang, M., Love, M. & Trush, W. 2004. Improving stream crossings for fish passage – Final Report. Humboldt State University Foundation: 76 S.
- Lange, D., 2007: Blockrampen – ökologische Bauwerke zur Sohlenstabilisierung. In: Minor, H.-E. (Hrsg.) Blockrampen: Anforderungen und Bauweisen. ETH Zürich, Zürich 5–21.



- Larinier, M. 2002. Fish passage through culverts, rock weirs and estuarine obstructions. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364 (supplément):119–134.
- Lauritzen D. V., Hertel, F. S., Jordan, L. K. & Gordon, M. S. 2010. Salmon jumping: behaviour, kinematics and optimal conditions, with possible implications for fish passageway design. *Bioinspiration and Biomimetics*. 5 (3):035006.
- Long, C. W. 1959. Passage of Salmonoids through a darkened fishway. U. S. Dept. of the Interior, Fish and Wildlife Service. Special scientific report - fisheries: Washington: 9 S.
- Louison, M. J. & Stelzer, R. S. 2016. Use of first-order tributaries by brown trout (*Salmo trutta*) as nursery habitat in a cold water stream network. *Ecology of Freshwater Fish*, 25:133-140.
- Lucas, M. L. & Baras, E. 2001. Migration of freshwater fishes. Blackwell Science, London: 420 S.
- Lucas, M. C. & Frear, P. A. 1997. Effects of a flow-gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. *Journal of Fish Biology*, 50 (2):382–396.
- Lucas, M. C., Thom, T. J., Duncan, A. & Slavik, O. 1998. Coarse fish migration occurrence, causes and implications. (Band Technical). Environment Agency: 167 S.
- Mahlum, S., Cote, D., Wiersma, Y. F., Kehler, D. & Clarke, K. D. 2014. Evaluating the Barrier Assessment Technique derived from FishXing Software and the upstream movement of Brook Trout through road culverts. *Transactions of the American Fisheries Society*, 143 (1):39–48.
- Meixler M. S., Bain M. B. & Walter M. T. 2009. Predicting barrier passage and habitat suitability for migratory fish species. *Ecological Modelling* 220:2782-2791.
- Merwald, I. D. 1986. Wildbäche als Fischgewässer. *Österreichs Fischerei*, 39:293-305.
- Mills, D. 1971. Salmon and trout. Oliver and Boyd, Edingburgh: 351 S.
- Mills, D. 1989. Ecology and management of Atlantic salmon. Chapman & Hall, London.
- ONEMA 2014. Informations sur la Continuité Ecologique – ICE. Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. 200 S.
- Ovidio, M. & Phillipart, J. C. 2002. The impact of small physical obstacles on upstream movement of six species of fish. Synthesis of a 5-year telemetry study in the River Meuse Basin. *Hydrobiologia*, 483 (3): 55–69.
- Pavlov, D. S. 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper 308:1-97.
- Peter, A., Schager, E. & Weber, C. 2008. Fischökologische Anforderungen an den Wasserbau. In: Minor, H. E. Neue Anforderungen an den Wasserbau. Band 2. VAW Zürich: S. 811-822.
- Powers, P. D. & Orsborn, J. F. 1985. Analysis of barriers to upstream fish migration. An investigation of the physical and biological conditions affecting fish passage success at culverts and waterfalls. US Department of Energy, Bonneville Power Administration, Division of Fish and Wildlife, Final Project Report Part 4 of 4. DOE/BP-36523-1, Project No. 198201400:134 S.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C. & Lodewyk, S. 1988. Hydraulics of offset baffle culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15:1043–1051.
- Reiser, D. W. & Peacock, T. T. 1985. A technique for assessing upstream fish passage problems at small-scale hydropower developments. Seiten 423-432. In Olson, F. W., White R. G., Hamre, R. H.



Editors. Symposium on small hydropower and fisheries. American Fisheries Society, Western Division, Bethesda, Maryland.

Rogers, A. & Cane, A. 1979. Upstream passage of adult salmon through an unlit tunnel. *Fisheries Management and Ecology*, 10 (2):87–92.

Rustadbakken, A., L'Abée-Lund, J. H., Arnekleiv, J. V. & Kraabøl, M. 2004. Reproductive migration of brown trout in a small Norwegian river studied by telemetry. *Journal of Fish Biology*, 64 (1):2–15.

Schläppi, T. 2011. Does restoration of longitudinal connectivity in rivers using block ramps enhance upstream migration of small fishes? Master thesis, University of Bern, Eawag: 27 S.

Schölzel, N. 2014. Bedeutung von Blockrampen für die Längsvernetzung der Fliessgewässer für ausgewählte Fischarten (Nicht-Salmoniden). Masterarbeit Universität Konstanz und Eawag: 102 S.

Schwevers, U., Schindehütte, K., Adam, B. & Steinberg, L. 2004. Zur Passierbarkeit von Durchlässen für Fische. *Untersuchungen in Forellenbächen. LÖBF-Mitteilungen*, 3:37–43.

Slatick, E. 1970. Passage of adult salmon and sea-trout through pipes. U.S. Fish and Wildlife Service Special Scientific Report on Fisheries (Band 592): 18 S.

Stuart T.A. 1962. The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions. *Freshwater and Salmon Fisheries Research*, 28:1–46.

Tudorache, C., Viaene, P., Blust, R., Vereecken, H. & De Boeck, G. 2008. A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fish*, 17 (2): 284–291.

Utzinger, J., Roth, C., & Peter, A. 1998. Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions. *Journal of applied Ecology*, 35:882–892.

Videler, J. J. 1993. *Fish Swimming*. Chapman & Hall: 206 S.

Weibel, D., Peter, A. & Schleiss, A., 2012: Durchgängigkeit von Blockrampen. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 6.

Warren, M. L. & Pardew, M. G. 1998. Road crossings as barriers to small-stream fish movement. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127:637–644.

